
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta přírodovědně-humanitní a pedagogická

Studijní program: N7504 – Učitelství pro střední školy

Studijní obor: Učitelství matematiky pro základní školy

Učitelství fyziky pro střední školy

Systém monitorování polohy zrcadel detektoru Čerenkovova záření

Mirror Position Monitoring System at Cherenkov Radiation Detector

Diplomová práce

Autor: **Tomáš Jerje**

Vedoucí práce: Doc. RNDr. Miroslav Šulc, Ph.D (TUL)

Konzultant: Ing. Lukáš Steiger

V Liberci 23. 11. 2010

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 23. 11. 2010

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Doc. RNDr. Miroslavu Šulcovi Ph.D., vedoucímu diplomové práce, za vedení, zájem, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Steigrovi za rady a konzultace.

Dále zde děkuji profesoru Miroslavu Fingerovi, z Karlovy univerzity v Praze, za umožnění a financování cesty do CERN.

Mé poděkování patří též mé rodině a blízkým přátelům za pomoc a podporu během studia.

Abstrakt

Systém monitorování polohy zrcadel detektoru

Čerenkovova záření

Práce se zabývá počítačovou simulací systému monitorování polohy zrcadel detektoru Čerenkovova záření. Detektor RICH-1, experimentu COMPASS v CERN, na urychlovači SPS, je detektor Čerenkovova záření, využívající plyn C_4F_{10} jako aktivní médium, které vytváří Čerenkovův efekt. Detektor RICH-1 se skládá ze dvou odrazných sférických povrchů, složených z pětiúhelníkových a šestiúhelníkových zrcadel s celkovou plochou $21m^2$, umístěných uvnitř detektoru. Dále pak z detekční plochy Čerenkovova záření.

Cílem práce je přispět ke korekci polohy Čerenkovských kroužků na rozladění jednotlivých zrcadel v detektoru RICH-1. Simulace byla provedena v počítačovém optickém softwaru Zemax. V nesekvenciálním módu byly testovány jednotlivé zdroje záření. Následně byl vybrán a optimalizován ten nejvhodnější. Složením zdrojů byla vytvořena mřížka, představující reflexní mřížku, která je použita v reálném experimentu. Dále byla provedena simulace a následné správné umístění jednotlivých šestiúhelníkových a pětiúhelníkových sférických zrcadel do souřadného systému. Velká část práce je věnována optimalizaci singletu (spojné čočky) a optické soustavě, která zde představuje objektiv, jenž je v detektoru RICH-1 použit ke snímání obrazu reflexní mřížky na zrcadlové stěně. Posledním prvkem byla simulace a optimalizace detektoru jako snímacího čipu.

Simulace kompletního detektoru se všemi specifickými prvky byla velmi náročná na hardwarové vybavení počítače. Databáze Zemaxu bohužel disponuje omezeným typem světelných zdrojů, proto byly provedeny simulace částí detektoru RICH-1.

Klíčová slova: RICH-1, Čerenkovovo záření, simulace

Abstract

Mirror Positron Monitoring System at Cherenkov Radiation Detector

This diploma thesis deals with the computer simulation of a mirror position monitoring system at Cherenkov radiation detector. RICH-1 detector of the COMPASS experiment at CERN on the SPS accelerator is a radiation detector of Cherenkov device, using C_4F_{10} gas as the active medium, which produces Cherenkov effect. The RICH-1 detector consists of two reflective spherical surfaces, composed of pentagonal and hexagonal mirrors located inside the detector with a total area of 21 square meters located in the detector. Furthermore, the detection surface of Cherenkov radiation.

The aim of this thesis is to contribute to the correction of the position of Cherenkov rings disgruntling individual RICH-1 detector mirrors. Simulations were carried out in an optical computer software Zemax. In non-sequential mode different sources of radiation were tested. Then the most suitable one was selected and optimized. Putting the radiation sources together a grid was created. The grid represents a reflective grid, which is used in a real experiment. Further simulations were performed, followed by appropriate placement of hexagonal and pentagonal spherical mirrors in the system of coordination. Much of the work pays attention to optimizing the singlet (converging lens) and the optical system, herein represented by a lens that is in the RICH-1 detector used to capture images of the reflecting the grid on the mirror wall. The final part was the detector simulation and optimization of detector as a sensing chip.

Full detector simulation with all the special features were very demanding on computer hardware. Database Zemaxu unfortunately has limited the type of light source, so they were made part of the detector simulation RICH-1.

Keywords: RICH-1, Cherenkov radiation, simulation

Zusammenfassung

System zur Überwachung der Position der Spiegel des Cherenkov Strahlungsdetektors

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Simulation des Systems zur Beobachtung der Lage der Spiegel des Detektors der Cherenkov Strahlung. Der Detektor RICH-1, des Experimentes COMPASS in Luzern, des Beschleunigers SPS, ist ein Detektor der Cherenkov Strahlung, welcher das Gas C_4F_{10} als ein aktives Medium verwendet und dadurch den sogenannten Cherenkov-Effekt erzeugt. Der Detektor RICH-1 besteht aus zwei sphärischen spiegelnden Oberflächen, welche aus fünf bzw. Sechseckigen Spiegeln mit einer Gesamtfläche von 21 m^2 im innern des Detektors gebildet werden. Des weiteren dann mit einer selbstprüfenden, fehlersuchenden Fläche der Cherenkov Strahlung.

Das Ziel dieser Arbeit ist es zur Korrektur der Lage der Cherenkov Ringe im Fall der Verstellung der einzelnen Spiegel im Detektor RICH-1 beizutragen. Die Simulation wurde im optischen Rechner-Software Zemax durchgeführt. Die einzelnen Quellen der Strahlung wurden in verschiedenen Modi gemessen. Dannach wurde der beste ausgesucht und optimialisiert. Durch zusammenfassen der Quellen wurde ein Gitter gebildet, welches das Gitter simulierte, welches im realen Experiment benutzt wurde. Des weiteren wurde die Simulation durchgeführt und entsprechend die richtige Positionierung der einzelnen fünf bzw. sechseckigen sphärischen Spiegel durchgeführt. Ein großer Teil der Arbeit ist der Optimierung der Singlet (Verbindungslinse) und des optischen Systems gewidmet, welches hier ein Objektiv darstellt, und hier im Detektor RICH-1 zum Ablichten des Bildes des reflektierenden Gitters von der Spiegelwand verwendet wird. Zuletzt wurde der Detektor durch Simulation als Aufnahme-Chip optimialisiert.

Vollmelder Simulation mit allen Besonderheiten wurden sehr hohe Anforderungen an Computer-Hardware. Database Zemaxu leider hat die Art der Lichtquelle begrenzt, so waren sie Teil des Detektors Simulation RICH-1.

Schlüsselwörter: RICH-1, Cherenkov Strahlung, Simulation

Obsah

0	Úvod	11
1	CERN - Evropská organizace pro jaderný výzkum	12
2	Experiment COMPASS.....	15
3	Detektor RICH-1.....	18
3.1	Princip detektoru RICH-1	18
3.2	Popis jednotlivých částí detektoru RICH-1	22
4	Systém pro monitorování zrcadel.....	22
4.1	Uchycení zrcadel a jejich technické parametry	24
4.2	Monitorovací zařízení v detektoru	26
4.2.1	Fotoaparát Canon 5D	26
4.2.2	Objektiv Canon 24 mm / 1:2,8.....	26
5	Kalibrace polohy zrcadel.....	27
5.1	Kalibrace polohy zrcadel autokolimátorem	27
5.2	Kalibrace pomocí pravoúhlé reflexní sítě	28
6	Simulace v programu ZEMAX.....	30
6.1	O programu Zemax	30
6.2	Hardwarová a softwarová konfigurace počítače.....	30
7	Simulace jednotlivých komponent detektoru.....	31
7.1	Simulace reflexních pásků	31
7.1.1	Source Radial	32
7.1.2	Source Two Angle	33
7.1.3	Source Rectangle	33
7.1.4	Orientace záření na zrcadlovní stěnu	35
7.2	Simulace stěny zrcadel.....	39
7.2.1	Simulace šestiúhelníkového zrcadla	40
7.2.2	Simulace pětiúhelníkového zrcadla	41
7.2.3	Zadávaní souřadnic a parametrů zrcadel	42
7.2.4	Souřadnice dolní levé čtvrtiny stěny zrcadel	44
7.3	Simulace objektivu	46
7.3.1	Optimalizace Singletu	48
7.3.2	Simulace tripletu	54
7.4	Simulace detektoru	55
7.4.1	Výběr vhodného detektoru.....	56
7.4.2	Detector Rectangle.....	56
7.4.3	Výpočet rozměru simulovaného detektoru	57
8	Simulace detektoru jako celku.....	59
9	Závěr	60
10	Literatura	61
11	Přílohy.....	63

Seznam použitých zkratek

ALICE	A Large Ion Collider Experiment
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
CLAM	Continuous Line Alignment and monitoring Method for RICH mirrors
COMPASS	Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy
ECAL	Electromagnetic CALorimeter
HCAL	Hadron CALorimeter
LHC	Large Hadron Collider
LHCb	Large Hadron Collider beauty
RICH-1	Ring Imaging Cherenkov detector
SPS	Super Proton Synchrotron

0 Úvod

Detektor RICH-1 umístěný ve vědecko-výzkumném středisku CERN slouží k zachycení informace o průletu nabitě urychlené částice. Měření je extrémně náročné na přesnost z důvodu malých rozměrů částic. Už malé odchylky mohou způsobovat velké chyby a vést k nepřesnostem měření. Proto systémy a prvky celého detektoru musí splňovat nejprísnější požadavky na kvalitu materiálů, čistotu prostředí, nastavení jednotlivých komponent podle předem určených parametrů.

V detektoru RICH-1 je jedním z takovýchto systémů soustava pětiúhelníkových a šestiúhelníkových sférických zrcadel. Už při výrobě byly kladeny ty nejvyšší požadavky kvality, stejně tak musí zrcadla na sebe přesně navazovat a dohromady tak vytvářet jedno velké sférické zrcadlo s aktivní plochou 21 m^2 . Je kladen důraz na přesnost polohy jednotlivých zrcadel. Změny teploty, změny hydrostatického tlaku, vibrace v detektoru způsobují nežádoucí vzájemné posunutí a natočení zrcadel vůči sobě, které nelze z důvodu kontinuálního měření experimentu v průběhu roku nijak ovlivnit ani korigovat. Ze všech informací o detektoru není lehké zajistit stálé správné nastavení a natočení zrcadel.

K pravidelné roční kontrole a seřizování polohy a natočení zrcadel se přistupuje pouze, pokud neprobíhá měření v detektoru. Bohužel to nestačí. Dnešní doba (rok 2010) stále více klade požadavky na přesnost měření a možnost korekce polohy zrcadel i v průběhu chodu urychlovače částic. Ovšem metoda, která by korekci během experimentu prováděla, je značně nákladná. Má diplomová práce se proto zabývá kontinuálním monitorováním polohy zrcadel v detektoru a následnou korekcí naměřených dat s ohledem na změřené rozladění.

Do dnešního roku bylo navrženo několik systémů, které by splňovaly náročné požadavky na přesnost měření vychýlení a natočení zrcadel i při chodu urychlovače. Nakonec byl vybrán a již realizován systém, který na zrcadla promítá přesnou pravoúhlou síť, kterou monitorují fotoaparáty. Snímky z jednotlivých fotoaparátů se analyzují na úrovni pixelů. Nepřesné vzájemné naklonění zrcadel vůči sobě se projevuje v nenávaznosti odražených proužků od soustavy zrcadel, které tvoří sférickou odraznou plochu.

V optické softwaru ZEMAX bylo nutno vytvořit model detektoru RICH-1, tedy sférické zrcadlo, složené z šestiúhelníkových a pětiúhelníkových zrcadel. Dále bylo potřeba simulovat pravoúhlou síť, tvořenou z reflexních pásek. V neposlední řadě

vytvořit optickou soustavu představující objektiv fotoaparátu, který se fyzicky již využívá k získávání obrazu o poloze jednotlivých zrcadel v detektoru RICH-1. V poslední části bylo nezbytné zjistit, jak se budou lišit získané obrazy z detektoru (fotoaparátu) v případě ideálního nastavení polohy zrcadel a v případě rozladění soustavy. Jednotlivé parametry a číselné údaje vycházejí ze skutečných hodnot, aby se nejvíce přiblížily skutečnému experimentu. Model detektoru RICH-1 by se využíval nejen pro metodu CLAM, ale i pro simulaci detekce Čerenkovova záření. Simulace čerenkovského záření se dá provádět pouze v nesekvenciálním módu, proto celý model vznikl v nesekvenciálním módu.

1 CERN - Evropská organizace pro jaderný výzkum

(z franc. Conseil Européen pour la recherche nucléaire)



Obr. 1: Logo CERN [1]

Evropská organizace pro jaderný výzkum je mezinárodní organizace se sídlem v Ženevě. Laboratoř leží na francouzsko-švýcarské hranici západně od Ženevy na úpatí pohoří Jura. Byla zřízena roku 1954. Cílem organizace je spolupráce evropských států v oblasti čistě vědeckého. Organizace se nezabývá činností pro vojenské účely, výsledky jejích experimentálních a teoretických prací se zveřejňují nebo jinak zpřístupňují veřejnosti. ČR se účastní její činnosti od roku 1993.

V současnosti stojí na samém čele lidského hledání, které je staré jako sám člověk. Úkolem laboratoře je porozumět tomu, z jakých součástí je hmota složena a jak tyto součásti spolu interagují. Jeho zařízení, urychlovače a detektory částic patří mezi největší a nejsložitější vědecká zařízení na světě. Se zdejšími zařízeními pracuje okolo 9500 vědců, což je polovina všech částicových fyziků na světě. Vědci reprezentují 500 univerzit či jiných odborných pracovišť a více než 80 národností. Ti zde mimo jiné zkoumají význam různých částic.

Všechno ve vesmíru je vytvořeno z částic, včetně nás samotných. Díky zdejší práci i jiných laboratoří ve světě zabývajících se částicovou fyzikou nyní víme, že k tomu, abychom vysvětlili složení obyčejné hmoty, potřebujeme pouhé čtyři druhy částic – stavebních kamenů. Tyto částice se nazývají kvark u , kvark d , elektron a elektronové neutrino. Země a všechno na ní, planety, Slunce a hvězdy na obloze jsou podle všeho vytvořeny za stejných čtyř základních součástí. Je to jako stavebnice. Z kvarků u a d se skládají protony a neutrony, které společně vytvářejí atomová jádra. Jádra spolu s elektrony v obalech tvoří atomy, které se dále různě spojují a vytvářejí složitější objekty. Čtvrtým členem rodiny je elektronové neutrino, které interaguje s ostatní hmotou tak slabě, že je dokážeme jen stěží pozorovat.

Základní částice hmoty představují jen polovinu celého příběhu. Na to, aby držely pohromadě, je třeba něco dalšího. „Lepidlo“ má podobu sil, které jsou samy tvořeny částicemi. Částice tvořící sílu se však velmi liší od částic hmoty. Jejich hlavním úkolem je přenášet interakce od jedné částice hmoty ke druhé. Gravitace, nejznámější síla, je ze všech nejslabší. Částice, o které se domníváme, že je jejím nosičem, graviton, nebyla do roku 2010 objevena. Na opačném konci měřítka síly je silná interakce, jejímž nositelem jsou gluony, které drží pohromadě kvarky a vytvářejí tak protony a neutrony v atomovém jádře. Silná interakce má kuriózní vlastnost: Čím jsou kvarky dále od sebe, tím je působení síly mezi nimi větší. To znamená, že kvarky jsou uvězněny uvnitř protonů či neutronů. Mezi oběma krajními póly co do intenzity se nacházejí další dva typy interakcí: elektromagnetická s nosiči fotony a slabá, jejímiž nosiči jsou částice W a Z . Elektromagnetická interakce udržuje elektrony na orbitách okolo jádra a drží pohromadě atomy v chemických či biochemických molekulách. Slabá interakce pomáhá hvězdám svítit a je také příčinou jednoho z typů radioaktivity (radioaktivity beta). Tyto dvě interakce jsou nyní vysvětlovány pomocí jedné společné teorie, nazývané elektroslabá teorie. To představuje důležitý krok na cestě, která vede k jednomu z hlavních cílů současné fyziky: Najít jednotnou teorii popisující všechny síly v přírodě.

Jednou z nejpřekvapivějších věcí v moderní částicové fyzice je existence dalších dvou rodin částic hmoty. Každá z nich je podobná čtveřici kvark u , kvark d , elektron a elektronové neutrino, až na to, že jsou těžší. Přirozeným způsobem se vyskytují jediné na exotických místech, jako jsou horká centra hvězd, ale jsou také produkovány na urychlovačích v CERN a podobných laboratořích.

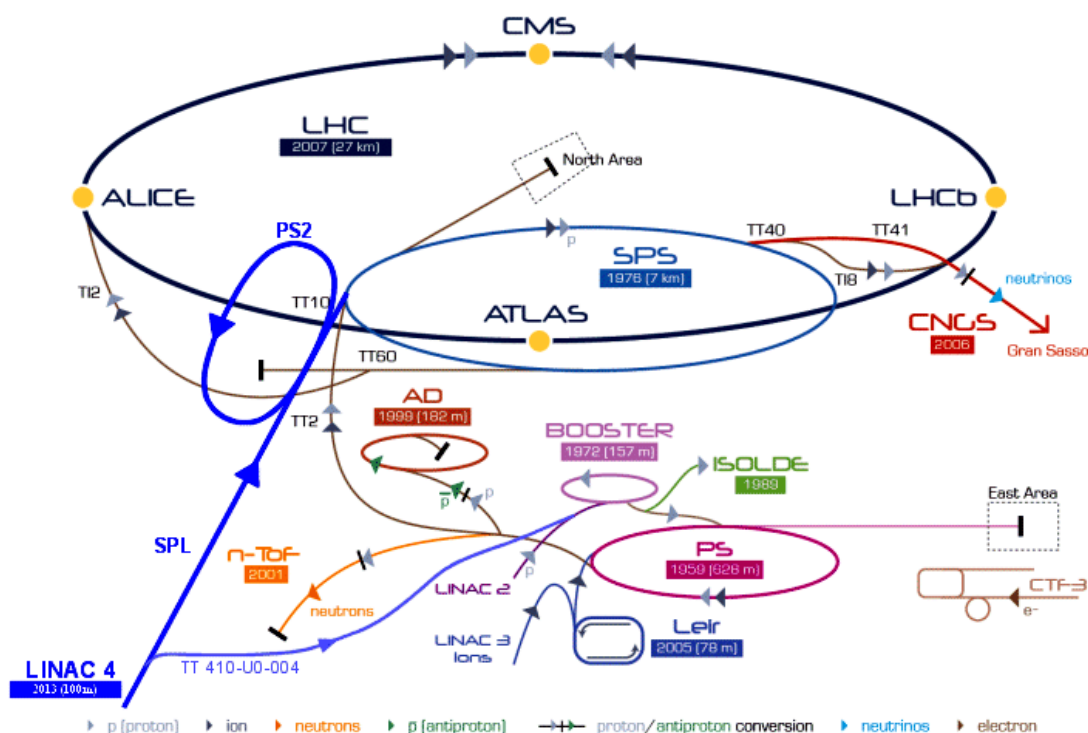
Sbírku částic v přírodě doplňuje antihmota, něco jako „zrcadlový obraz“ obyčejné hmoty. Antihmotu předpověděl v roce 1928 britský fyzik Paul Dirac. Brzo poté Američan Carl David Anderson antihmotu skutečně objevil ve srážkách vysokoenergetických částic kosmického záření. Volná antihmota dnes ve vesmíru neexistuje. Těsně po velkém třesku, kdy vesmír vznikl, hmota a antihmota existovaly v rovnováze, tedy že bylo stejně antihmoty, jako hmoty.

Teorie popisu částic hmoty a částic – nosičů síly se nazývá standardní model. Ačkoli už po více než 20 let úspěšně prochází všemi experimentálními testy, není standardní model úplným popisem přírody. Fyzikové v CERN přispívají svou prací k vytvoření dokonalejší představy, jak vesmír funguje.

2 Experiment COMPASS

(COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)

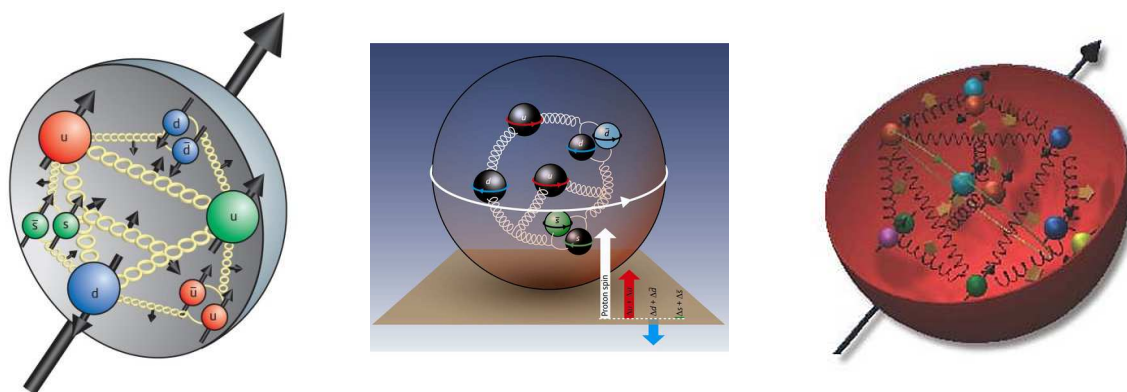
Počátkem roku 1997 byl schválen projekt COMPASS, ten je tím v současnosti jedním z nejdéle probíhajících experimentů výzkumného centra částicové fyziky CERN (European Organization for Nuclear Research). Je napojen na urychlovač částic SPS (Super Proton Synchrotron), což je urychlovač částic, který dodává svazek polarizovaných hadronů, urychlených na přibližnou rychlost 0,95 rychlosti světla. Během roku 2005 a jara 2006 došlo k významným aktualizacím subsystémů, s kterými pracuje až do dnešní doby.



Obr. 2: Schéma jednotlivých urychlovačů v CERN

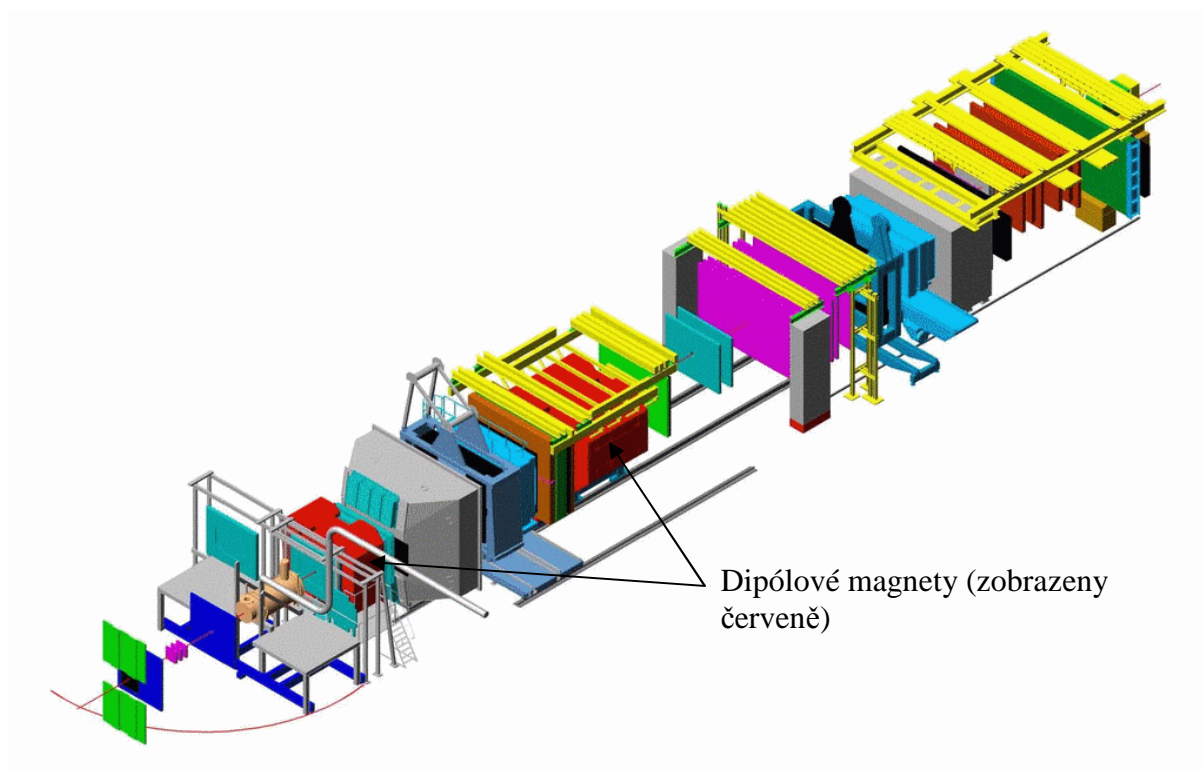
Projekt COMPASS sdružuje přes 200 odborníků z celého světa, včetně české skupiny odborníků z Technické univerzity v Liberci, Fakulty matematicko-fyzikální (Karlova univerzita), Českého učení technického v Praze, Ústavu přístrojové techniky AV ČR.

Hlavním cílem experimentu COMPASS je studovat hadronovou strukturu a spektroskopii pomocí interakcí urychlených částic, které v případě projektu COMPASS dodává urychlovač SPS. Experiment se snaží ověřit matematické teorie, které jsou předpokládány delší dobu, popř. zjistit princip a složení vnitřní struktury a spinu nukleonů.



Obr. 3: Dopusavadní představy o struktuře a spinu nukleonů, které se snaží ověřit experiment COMPASS

Uvnitř COMPASS bychom našli polarizovaný terč, různé typy identifikačních systémů (detektory částic) a spektrometrické magnety. V polarizovaném terči dochází ke srážkám urychlených částic z urychlovače SPS s plynem Li_6D . Nukleony v terči jsou polarizovány na určitou úroveň a je v něm udržována stálá teplota 5 mK. Spektrometrické magnety slouží k nasměrování nabitých částic a detektory částic umožňují přesné zaznamenání částice v prostoru a čase, např. elektromagnetický a hadronový kalorimetr pro odhalení mionů (ECAL, HCAL) a RICH detektor, který identifikuje částice, abychom určili jejich rychlost a hybnost (obr. 4) [2], [3], [4].

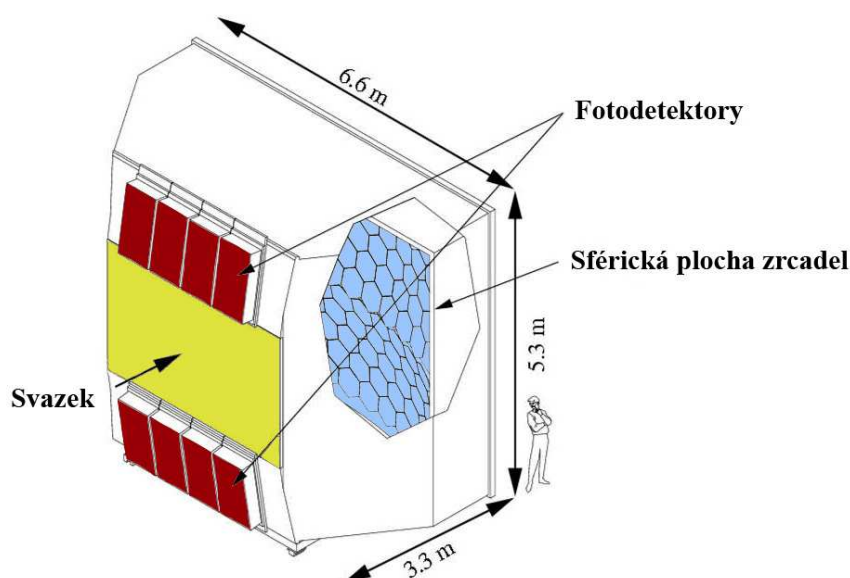


Obr. 4: Blokové schéma COMPASS [4]

3 Detektor RICH-1

(Ring Imaging CHerenkov)

Známe-li moment detekované částice usměrněné v jiném detektoru, je možné dostat informaci o průletu částice právě v RICH-1. Existuje více detektorů RICH-1 pracujících např. v experimentech ALICE, LHCb apod. V této diplomové práci se budeme zabývat pouze jedním detektorem RICH-1, a to tím, který je součástí kolaborace COMPASS v CERN (obr. 5).

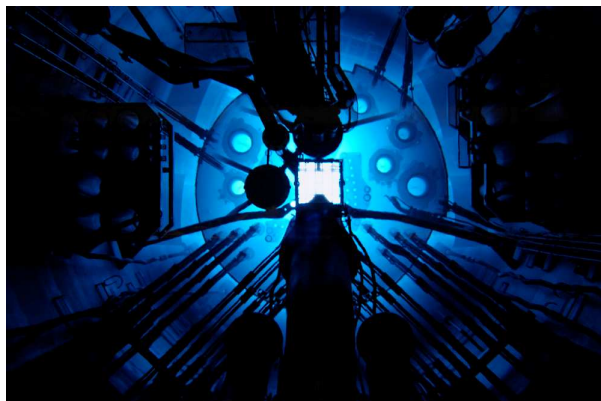


Obr. 5: Detektor RICH-1 [5]

3.1 Princip detektoru RICH-1

RICH-1 detektory částic jsou typy detektorů pracujících na principu snímání Čerenkovova záření. RICH-1 se skládá ze soustavy zrcadel a fotodetektorů (většina plochy detektorů jsou drátkové detektory a část je pokrytá fotonásobiči). Celý detektor je naplněný plynem C_4F_{10} sloužící jako aktivní médium, které vytváří Čerenkovovo záření. Měření nabitých částic je závislé na **Čerenkovovu efektu**: „pohybuje-li se částice v optickém prostředí rychleji, než je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření, které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než světlo.“ Typicky lze Čerenkovův efekt pozorovat v nádržích jaderných reaktorů, kde se uranové palivo

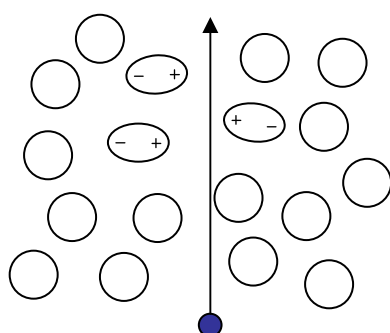
nachází v kapalině moderující neutrony, a voda působením elektricky nabitých částic získává modravý nádech. Částice procházející rychleji než světlo způsobí polarizaci prostředí.



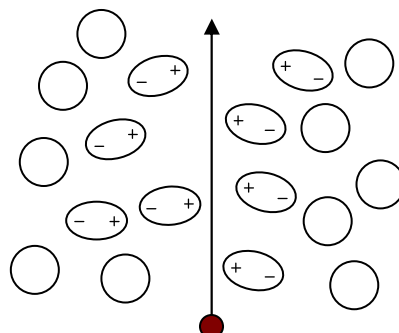
Obr. 6: Čerenkovovo záření uvnitř jaderného reaktoru

Při průchodu elektricky nabité částice nebo záření gama látkovým prostředím dochází k místní polarizaci atomů a molekul podél dráhy. Po průchodu částice se atomy samy opět depolarizují, přičemž získanou energii vyzařují ve formě elektromagnetického záření. To podléhá interferenci, jejíž výsledek závisí na rychlosti částice.

Je-li rychlost pohybu částice v prostředí větší než je fázová rychlost světla, mohou se elektromagnetické vlny, vznikající v různých místech dráhy, dostat do fáze. Ve vhodném úhlu θ se tyto fáze mohou sečíst a vznikne pozorovatelné záření [2], [4].



pomalá částice



částice s větší rychlostí, než je fázová rychlost světla v daném prostředí

Obr. 7: Polarizace při Čerenkovově efektu

Polarizované atomy zobrazené na obr. 7 vybudí díky interferenci Čerenkovovo záření, které vytvoří kuželovou vlnoplochu, která s osou dopadu částice svírá úhel θ_c , viz obr. 8. Úhel θ_c se získá ze vzorce: [6]

$$\cos \theta_c = \frac{1}{n(\lambda)\beta} + \left(\frac{\hbar}{\lambda p} \frac{n^2 - 1}{2n^2} \right) \quad (1)$$

kde: $\beta = \frac{c}{v}$

c - rychlost světla ve vakuu

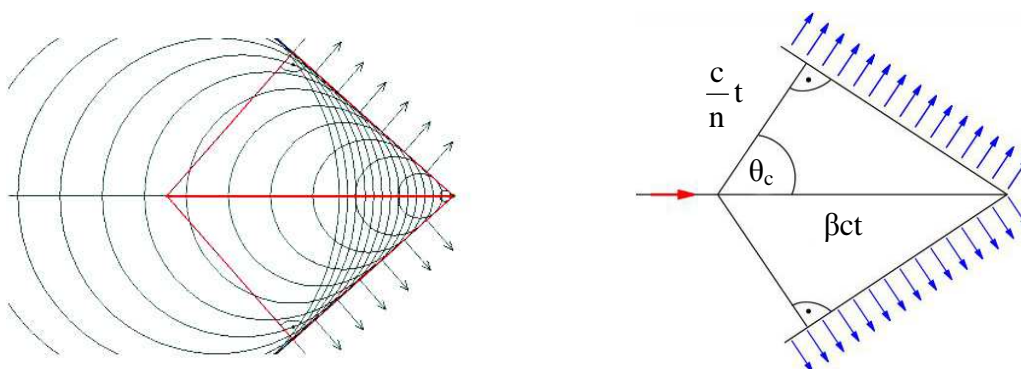
Čerenkovovo záření se objevuje jen tehdy, když je $|\cos \theta_c| \leq 1$. Tento jev se vyskytuje jen pro určitou rychlost částice. Energetický práh je tudíž:

$$\gamma_t = \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

kde: $\gamma_t = \frac{E}{mc^2}$

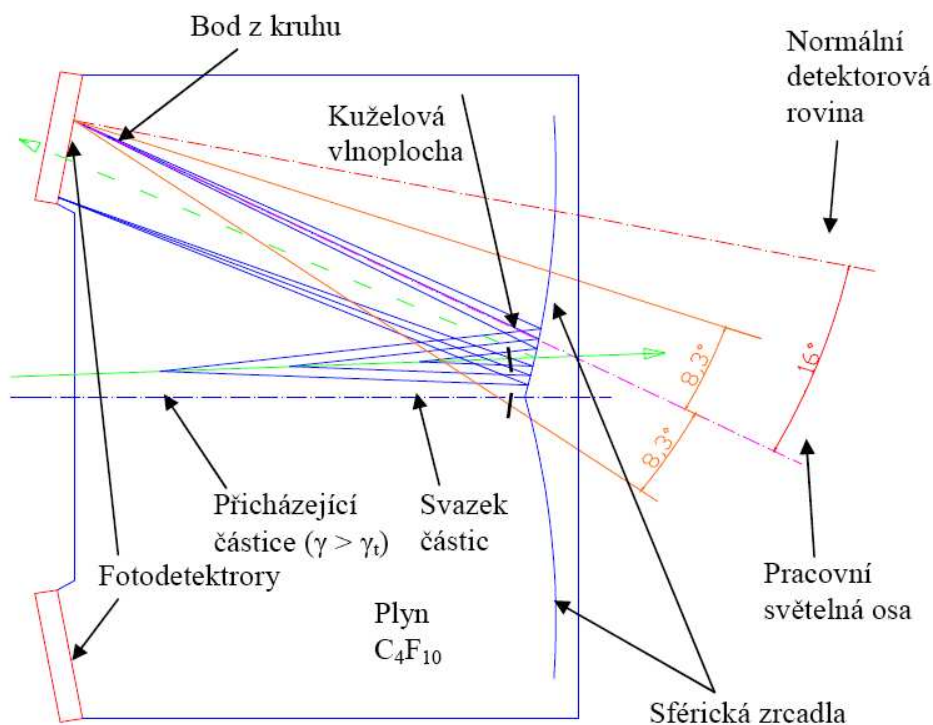
m – hmotnost částice

E – energie částice



Obr. 8: Řez kuželem, který vytváří společná obálka kulových vlnoploch rozbíhajících se od bodů dráhy částice při vzniku Čerenkovova záření. Na obrázku červená šipka znázorňuje rychlost částice, β je poměr v/c , n je index lomu prostředí. Modré šipky ukazují směr šíření Čerenkovova záření.

K detekci Čerenkovova záření v RICH-1 je v detektoru umístěna soustava sférických zrcadel, složených ze 116 elementů o celkové ploše 21 m², od kterých se Čerenkovovo záření odráží pod určitým úhlem. Systém fotodetektorů zaznamenává odražené Čerenkovovo záření a následně dochází k vyhodnocení (obr. 9).



Obr. 9: Schéma principu činnosti RICH detektoru s Čerenkovovým zářením. Kužel (modrý) se transformoval do kruhu na plochu fotonásobičů, který je centrován kolem virtuální částice (zelená). Úhel akceptance je znázorněn oranžovou barvou [3].

Měření hmotnosti je obvykle prováděno s přesností:

$$\left(\frac{dm}{m}\right)^2 = \left(\gamma^2 \frac{d\beta}{\beta}\right)^2 + \left(\frac{dp}{p}\right)^2 \quad (3)$$

Hybnost p je relativně snadno měřitelná tak, že rozlišení částic o hmotnosti m_1 a m_2 vyžaduje rozlišení relativních rychlostí $\Delta\beta$:

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} \cong \frac{m_1^2 - m_2^2}{2p^2} \quad (4)$$

3.2 Popis jednotlivých částí detektoru RICH-1

Detektor RICH-1 je největší a nejsložitější detektor, který je použit v experimentu COMPASS. Detektor byl navržen pro identifikaci hadronů až do výkonu ~ 60 GeV/c. Úhel snímání částic je ± 250 mrad vodorovně a ± 180 mrad ve svislé rovině.

Snímací plocha se skládá z osmi částí mnohokanálových drátkových detektorů fotonů (**MWPC**) s velkou plochou CsI fotokatody, umožňující detekci samotného fotonu. Uprostřed detekční plochy byly MWPC nahrazeny multikanálovými fotonásobiči. Citlivá oblast detekce fotonů pokrývá celkem $5,3 \text{ m}^2$.

Segmenty jednotlivých zrcadel jsou koncipovány tak, aby odrazily přicházející Čerenkovovo záření přesně na určenou plochu, kde se nachází fotodetektory. Proto jsou kladeny vysoké nároky na přesné umístění všech součástí RICH-1 a správné nastavení a natočení segmentů zrcadel na fotodetektor, jak je vidět na obr. 10.

Kontinuální měření je provázáno spoustou vnějších vlivů, které negativně působí na přesnost měření. Na soustavu zrcadel upevněnou ve speciálních držácích působí především vibrace, změny atmosférického tlaku, teplotní změny, které způsobují teplotní dilataci materiálu. To vede k mírnému posunování zrcadel vůči sobě a zhoršení přesnosti měření. Je tedy třeba tyto odchylky v natočení zrcadel monitorovat a případně korigovat do žádaných hodnot.

Do této doby se před experimentem jednotlivé segmenty nastaví do požadované polohy, které se během měření nijak nekorigují. Budoucností je kontinuální monitorování polohy a korigování zrcadel do správné polohy (tato metoda je ovšem finančně velice nákladná), nebo alespoň kontinuální monitorování polohy zrcadel a korekce výsledků měření podle předem stanoveného algoritmu.

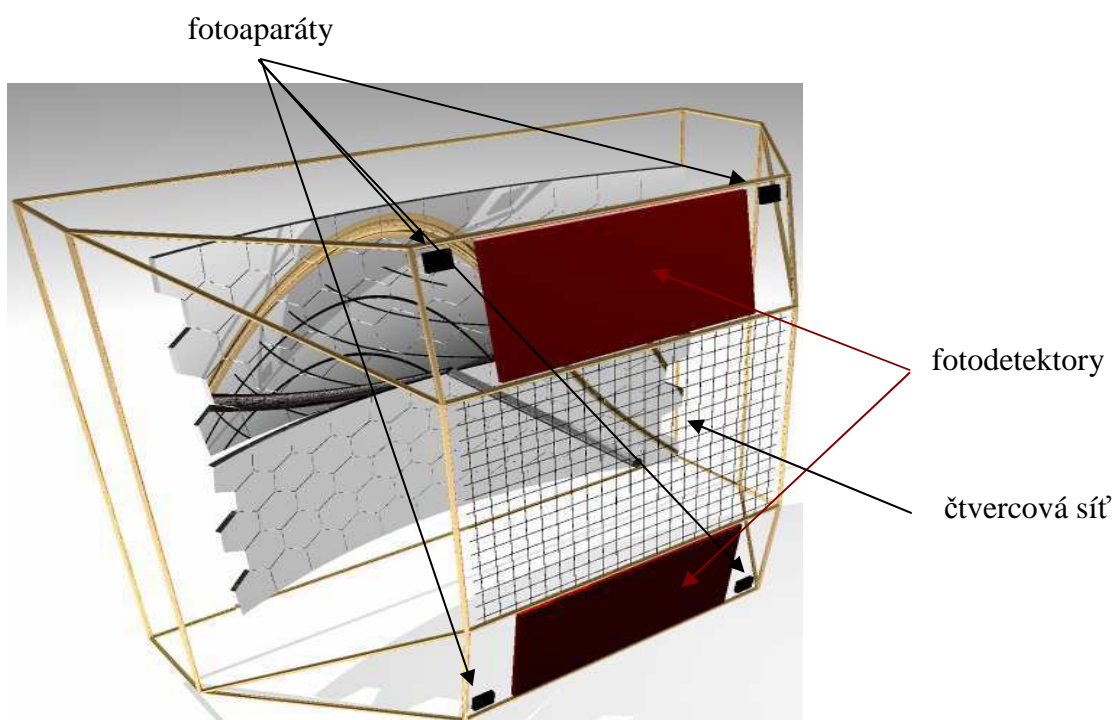
4 Systém pro monitorování zrcadel

Soustavu zrcadel je nutné neustále monitorovat a zajišťovat správné nastavování všech zrcadel.

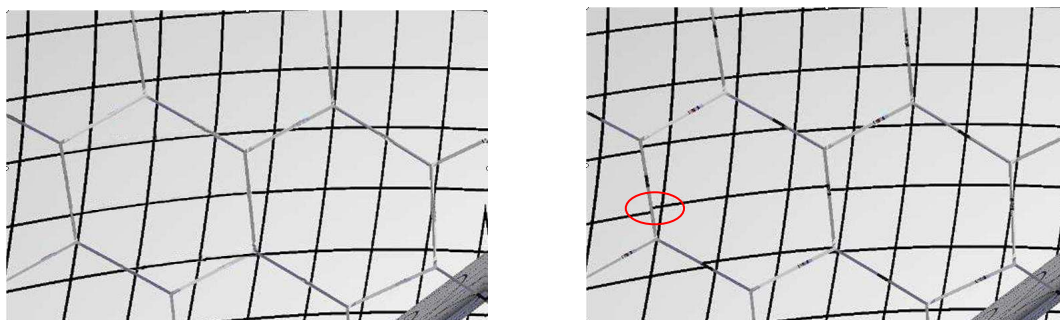
Jednou z možností, jak je možné sledovat polohu zrcadel, je např. teodolitem v autokolimačním režimu. Po zvážení všech možností a podmínek, které RICH-1 poskytuje, bylo rozhodnuto použít systém, který navrhl Sergio Costa – promítání čtvercové sítě na plochu zrcadel a optickými snímači sledování přesnosti zobrazené sítě

tzn. přesnost nastavení zrcadel. Výhoda tohoto systému spočívá v jeho možnosti monitorování všech zrcadel současně a v dobré realizovatelnosti. Velkou výhodou je také možnost softwarové korekce nepřesností zrcadel oproti mechanickému nastavování.

Navržený systém pro snímání se skládá ze čtyř fotoaparátů, které jsou umístěny v rozích přední části detektoru spolu s čtvercovou sítí, která se promítá na zrcadla. Jediná reálná možnost umístění fotoaparátů, z důvodů nedostatku místa, je vedle fotodetektorů (obr. 10). Podle obr. 10 bylo také třeba ověřit umístění sítě tak, aby fotoaparáty snímaly na každém zrcadle část příslušné sítě [5], [7].



Obr. 10: Umístění fotoaparátů a kalibrační čtvercové sítě [5]



Obr. 11: Ukázka správně nastavených zrcadel (vlevo), rozladěná zrcadla (vpravo) [5]

4.1 Uchycení zrcadel a jejich technické parametry

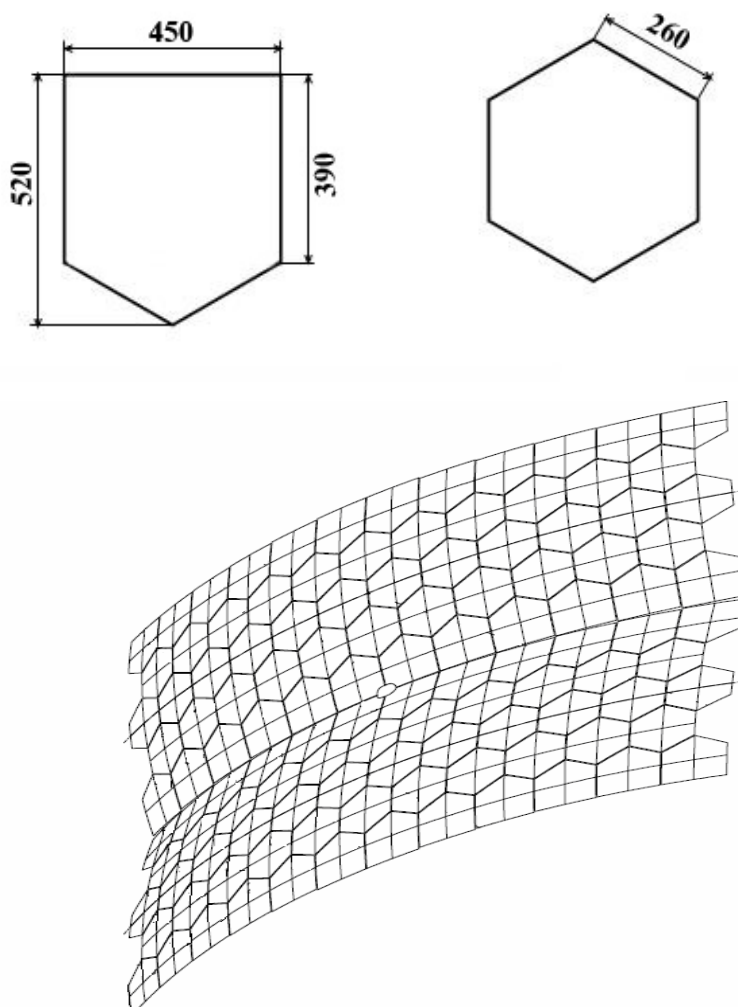
K navrhnutí a počítačové simulaci celého monitorovacího systému RICH-1 je potřeba znát přesné rozměry detektoru a parametry použitých zrcadel. Uvedená mozaika zrcadel se skládá ze 116 sférických zrcadel, jejichž výroba probíhala v České republice.

Všechna zrcadla mají stejné optické parametry i stejné velikosti (68 šestiúhelníkových a 48 pětiúhelníkových) o celkové ploše 21 m². Celá plocha zrcadel se skládá ze dvou shodných sférických částí, které jsou vychýleny od svislé osy o 5° [5], [7].

Poloměr křivosti je: $R = 6600 \text{ mm} \pm 1 \%$

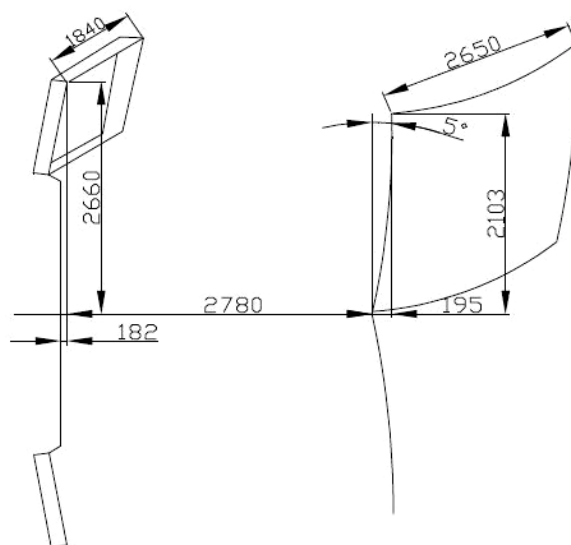
Ohnisková délka: $f = R/2 = 3300 \text{ mm}$

Odrazivost: $r > 50 \%$ (160-200 nm)



Obr. 12: Parametry pětiúhelníkových a šestiúhelníkových zrcadel (nahore), stěna 116 zrcadel sestavená z těchto segmentů (dole)

Rozměry plochy zrcadel a hodnoty umístění od fotodetekční plochy jsou na obr. 13.



Obr. 13: Parametry jedné čtvrtiny detektoru RICH-1

V případě známosti přesných rozměrů plochy jednotlivých zrcadel a vzdáleností detektorů je již možno navrhnout snímací systém, který by monitoroval celou plochu zrcadel. Dále by rovněž snímal obraz v dostatečně kvalitním rozlišení z důvodu ostroty obrazu. Zrcadla musí být uchycena tak, aby se dalo provádět nastavení jednoduše a přesně. Proto jsou nalepená na otočném kloubu, jehož vychýlení lze přesně nastavovat dvěma rameny. Nastavování tohoto systému držáku je možné s přesností 0,1 mrad.

Aby byl splněn pohyb do všech úhlů, jsou zrcadla uchycena na kloubu. Pohyb pro vychýlení kloubu se zrcadlem zajišťují natáčecí ramena (obr. 12a). Zrcadla jsou na držácích nalepena [5], [7].



Obr. 14: Ramena pro natáčení zrcadla (a), celý držák (b), uchycení zrcadla (c) [6]

4.2 Monitorovací zařízení v detektoru

V detektoru se pro snímání obrazu reflexní mřížky na stěně zrcadel používá soustava čtyř fotoaparátů Canon 5D s nasazenými objektivy Canon 24 mm / 1:2,8.

4.2.1 Fotoaparát Canon 5D

Pro monitorování polohy zrcadel se využívá sestava složená ze čtyř fotoaparátů značky Canon s označením 5D. V době, kdy byly fotoaparáty vybírány, se jednalo o špičku ve fotografické technice jak po stránce konstrukce a rozlišení čipu, tak i po stránce zpracovávání obrazu. Doba pokročila a dnes se jedná o střední třídu. Technické vlastnosti Canonu 5D byly již dávno překonány.

Při výběru nejvhodnějšího fotoaparátu bylo třeba respektovat podmínky a technická omezení v RICH-1 a brát v úvahu všechny požadavky na kvality obrazu, které jsou zapotřebí pro jeho zpracování. Mezi tyto požadavky patří co nejvyšší rozlišení, aby mohlo být později užito co nepřesnějšího elektronického zpracování na počítači (vyhodnocování a korekce nepřesností), možnost externího napájení fotoaparátů a synchronizovaná, dálkově ovládaná spoušť.

Jednou z hlavních a nejužitečnějších výhod fotoaparátu je použitý čip CMOS o velikosti 35,8 mm × 23,9 mm s efektivním rozlišením 12,8 Mpix. V kombinaci velikosti čipu a rozlišení vychází velikost jednoho pixelu na čipu 8,2 μm × 8,2 μm. Maximální rozlišení, kterého lze dosáhnout, je 4368 × 2912 bodů (pixelů).

S použitým čipem také souvisí minimální šum při nízkých nastavených ISO. Fotoaparát má USB, který mimo jiné umožňuje fotoaparát externě ovládat např. z notebooku [9].

4.2.2 Objektiv Canon 24 mm / 1:2,8

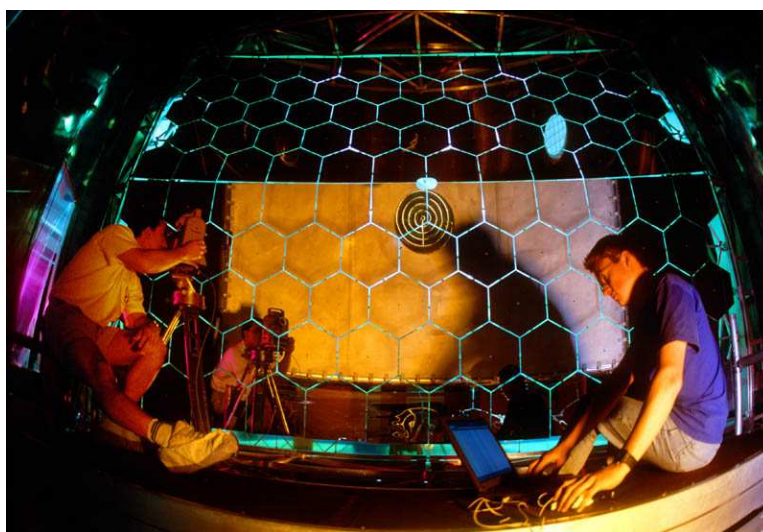
Na těle fotoaparátu je nasazen objektiv CANON EF 24 mm, f/2,8. Jedná se o světelný širokoúhlý objektiv s minimálním zkreslením obrazu, je nesmírně ostrý a nabízí kvalitnější korekci lineárního zkreslení. Jako jeden z mála objektivů splňuje vysoké nároky pro použití v detektoru. Je to objektiv konstruovaný přímo na digitální zrcadlová těla se snímačem full frame.

5 Kalibrace polohy zrcadel

5.1 Kalibrace polohy zrcadel autokolimátorem

Naprostá většina detektorů provádí měření polohy zrcadel pomocí teodolitu v autokolimačním módu. Před každý segment zrcadlové stěny je umístěn teodolit. Jako referenci lze v případě RICH-1 použít souřadnice centra jedné ze sfér. Tyto souřadnice jsou dány vzhledem k rámu, na kterém jsou zrcadla připevněna. Osy teodolitu musí ležet na spojnici centra teodolitu s centrem dané sféry (obr. 15).

Pokud je zrcadlo nesprávně natočené, pak spolu vektor spojnice a vektor normály zrcadla svírají určitý úhel a obraz osního kříže v zrcadle je vychýlený. Aby se zrcadlo dostalo do správné polohy, jeho normála musí být souběžná se spojnici. Takto je možné nastavit každé zrcadlo s přesností 0,1 mrad. Během měření je teodolit umístěn před každé zrcadlo pomocí upraveného lešení, které se musí vždy před začátkem měření nainstalovat a po skončení opět odebrat, a tedy není a nemůže být stálou součástí detektoru.



Obr. 15: Pracovníci CERN provádí kalibraci jednotlivých zrcadel za pomoci teodolitu [7]

Je patrné, že nevýhodou této procedury je její časová náročnost (za den je možné naměřit orientaci přibližně deseti zrcadel). Další zřejmou nevýhodou je nutnost přístupu dovnitř detektoru. Z praktického hlediska to znamená odsunutí okolních detektorů, vysunutí detektoru z jeho přesně dané polohy a následného vypuštění C_4F_{10} . Dále je nutné demontovat tu část detektoru, jež brání přístupu k podpěrnému rámu zrcadel.

Celou proceduru je možné absolvovat pouze v období, kdy není spuštěn svazek částic, resp. kdy neprobíhá měření. Tento stav nastává prakticky jednou za tři až čtyři roky. Na druhou stranu je tato metoda velice přesná, proto je vhodná zejména pro počáteční nastavení zrcadel, navíc v omezeném prostoru, jakým vnitřek detektoru skutečně je. Vzhledem k měnícím se podmínkám uvnitř detektoru (změna teplot, tlaku, mechanické vibrace), je snaha natočení zrcadel monitorovat, případně rovnou korigovat i během probíhajících měření [7].

Pro detektor RICH v experimentu Hera-B byl vyvinut systém pro sledování polohy zrcadel za chodu detektoru. Metoda využívá data měřená detektorem RICH. Konkrétně jsou zaznamenány údaje vysoko-energetických částic, pro které je možné předem spočítat Čerenkovův úhel a zjistit tak předpokládané místo dopadu emitovaného fotonu (v detekční části RICH), které odpovídá správně nastavené poloze zrcadel. Porovnáním pozice rekonstruovaných kroužků (z reálných dat) a těch spočítaných (ideálních), je možné zjistit informaci o natočení zrcadel.

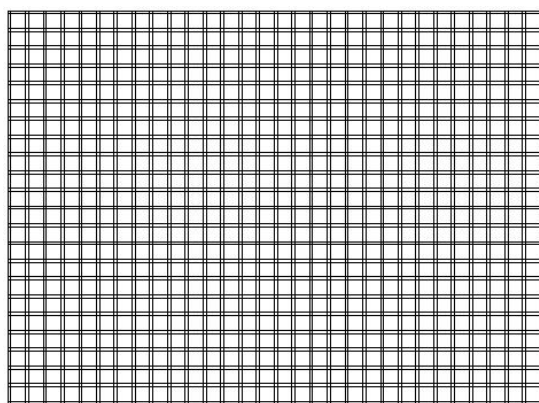
5.2 Kalibrace pomocí pravoúhlé reflexní sítě

Od původního záměru, vytvořit pravoúhlou síť z luminiscenčních vláken, se opustilo, protože u tohoto typu sítě by bylo velmi náročné zabezpečit, aby nedocházelo ke chvění. Nakonec se podařilo vytvořit síť z reflexních pásků, která se vhodným způsobem osvětluje vysokosvitivými LED diodami.

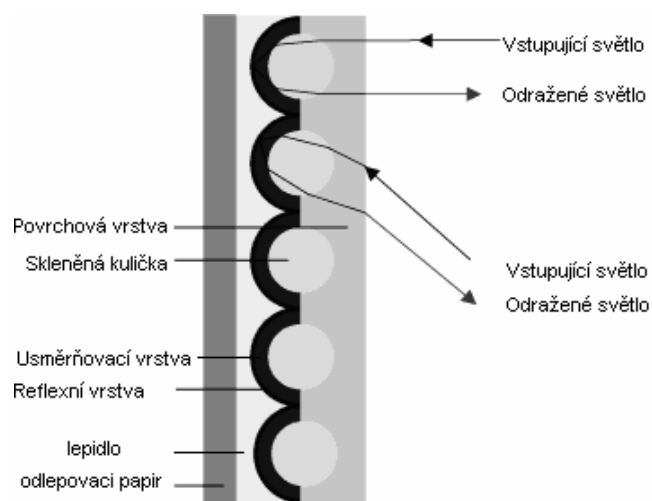
Reflexní pásky se skládají z materiálu, který byl speciálně vyvinut pro noční osvětlení silnic a dálnic. Světlo dopadající na reflexní vrstvu v nahodilém směru se odráží zpět speciálním způsobem. Tím se zvyšuje viditelnost odraženého světla ze směru světelného zdroje. Světlo odrážející se z odrazného materiálu vyzařuje tak, že se zdá, jako by páska zářila [7].

Struktura reflexního materiálu se skládá z tisíce malých skleněných kuliček (jen 40–90 μm v průměru), rovnoměrně uspořádaných v pryskyřici, takže dohromady dávají plochu tenkou 100–300 μm . Každá kulička je kompletní kulovité tělo, které pracuje jako optická spojka. Dopadající světlo se láme na povrchu materiálu a je soustředěné

do jednoho bodu. Poté se odráží na zrcadlíci vrstvě ve spodní části kulovitého těla a vrací se směrem ke světelnému zdroji. Následkem toho odrážející se světelný paprsek způsobuje, že reflexní proužek vypadá jako samostatný zdroj světla (obr. 17) [10].



Obr. 16: Reflexní pravoúhlá síť (šířka reflexních pásků 10 mm, mezery mezi pásky 100 mm)



Obr. 17: Princip činnosti reflexního pásku [10]

6 Simulace v programu ZEMAX

Hlavním úkolem této diplomové práce je v první řadě navrhnout počítačovou simulaci detektoru RICH-1 v počítačovém programu ZEMAX. Tedy simulaci stěny zrcadel, reflexní pravouhlé sítě, detektoru a kamery, která by snímala odraz sítě od zrcadlové stěny. V druhé části, po odladění funkčnosti simulace, změřit závislost naklonění vybraných zrcadel na vzdálenosti nespojitého obrazu reflexní sítě na zrcadlové stěně v pixelovém rozlišení. Dále je potřeba hodnoty nasimulovaného rozladění porovnat s hodnotami reálnými, které v roce 2008 provedl diplomant Marek Švec.

6.1 O programu Zemax

Zemax je softwarový program, díky jemuž můžeme modelovat a simulovat návrhy optických systémů. Zemax byl navržen pro snadné použití a s trochou praxe nám může dovolit velmi rychle simulovat optické prvky a děje. Uživatelé nabízí dva odlišné módy, sekvenciální a kombinaci sekvenciálního a nesekvenciálního módu. Sekvenciální mód umožňuje definici objektů pomocí jednotlivých ploch s určitými parametry, nesekvenciální mód má předem nadefinované objekty, které lze upravovat. Objekt se zde tvoří jako celek s homogenními vlastnostmi. Pro simulaci jednotlivých komponent byl vybrán nesekvenciální mód, jelikož simulace Čerenkovova záření se dá provádět pouze v tomto módu [11], [12].

6.2 Hardwarová a softwarová konfigurace počítače

(pouze ty parametry, které mohou ovlivnit rychlost simulace)

Procesor	AMD Sempron(tm) 2400+ , 1,67GHz
Paměť RAM	DDR2 768MHz
Grafická karta	Radeon 9600 PRO Family
Pevný disk	Samsung SpinPoint F3 - 1TB
Operační systém	Windows XP Professional

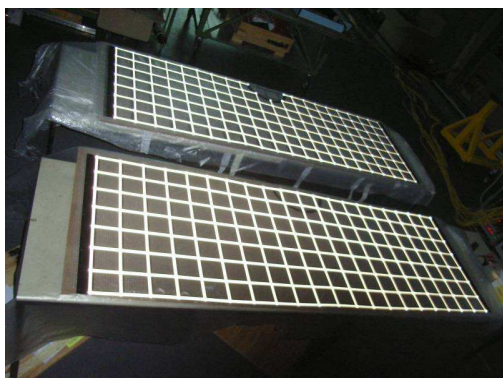
7 Simulace jednotlivých komponent detektoru

Tato část diplomové práce se zabývá konkrétním návrhem simulace zdroje záření, zrcadlové stěny, objektivu a detektoru za účelem vytvořit co nejvíce podobný virtuální systém monitorování polohy zrcadel tomu reálnému.

7.1 Simulace reflexních pásků

V detektoru RICH-1 je kalibrační síť řešena pravoúhlým uspořádáním pásků o šíři 10 mm z reflexního materiálu. Mezi jednotlivými reflexními páskami je 100 mm mezera (obr. 18). Tato plocha je osvětlována vysoce svítivými bílými LED diodami. Měření ukázalo, že bílé LED diody jsou nejlepší volbou z hlediska vyzařovaného výkonu a tím je možné použít kratší expoziční doby a zlepšit ostrost výsledného obrazu. Měření vhodného osvětlení sítě reflexních pásků a délku expozičního času provedl Marek Švec ve své diplomové práci.

LED dioda má pro naše použití velký vyzařovací úhel. Před LED diodami jsou umístěny vhodné čočky, které usměrňují světelný kužel vždy na jednu čtvrtinu zrcadlové stěny, kterou snímá daný objektiv fotoaparátu (obr. 19).



Obr. 18: Reflexní pravoúhlá síť (šířka reflexní folie 10 mm, mezery mezi pásky 100 mm) [13]



Obr. 19: Osvětlovací systém a držák fotoaparátu namontovaný do RICH-1 [6]

Počítačová simulace využívá odlišného způsobu projekce sítě reflexních pásků na zrcadlovou stěnu. Namísto reflexních pásků jsou použity zdroje záření. Tedy každý pásek je tvořen samostatným zdrojem záření. Tento způsob urychluje čas simulace a dovoluje nastavení více parametrů při simulování vhodné projekce sítě reflexních pásků.

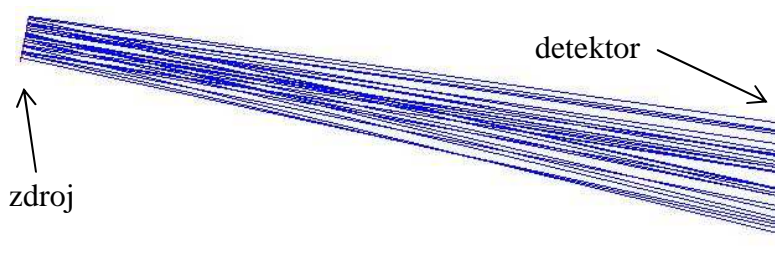
Nejprve je však nutné otestovat jednotlivé zdroje, které nabízí software Zemax. Výběr vhodného zdroje záření je důležitý k co největšímu přiblížení skutečnosti. Po prostudování manuálu k Zemaxu jsem vybral tři zdroje záření, které budu testovat (Source Rectangle, Source Two Angle, Source Radial). Je potřeba vybrat ten, který umožňuje nastavení úhlu vyzařování v jednotlivých směrech, rozložení intenzit paprsků na vyzařovaném úhlu.

Pro urychlení výpočtů a zobrazení při simulaci jsem jednotlivé typy zdrojů zkoušel jako samostatný jeden pásek [14].

7.1.1 Source Radial

Source Radial je plošný eliptický nebo obdélníkový zdroj záření, který vyzařuje do polokoule. Počtem bodů (number of point) v základním editoru rozdělíme čtvrtinu sféry na části, ve kterých můžeme libovolně definovat jednotlivé intenzity. Počet dělících bodů může být libovolné celé číslo od 5 do 180.

Na obr. 20 je simulace zdroje Radial. Z ní je patrné, že ke směřování záření je potřeba natáčet celou plochu zdroje záření.



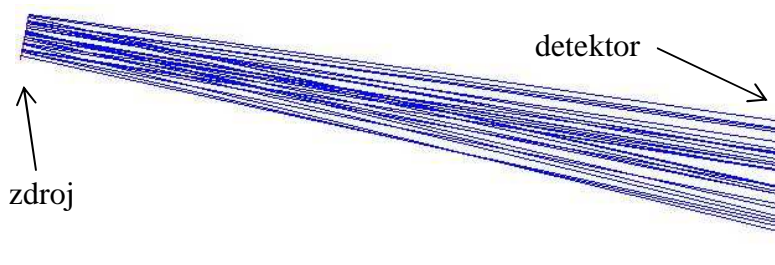
Obr. 20: Simulace zdroje Radial

Pro směřování paprsků záření je zapotřebí celým zdrojem natáčet. To není výhodné z hlediska časové náročnosti ani podobnosti s realitou v RICH-1. V další simulaci nebude využíván.

7.1.2 Source Two Angle

Source Two Angle je plošný zdroj záření, který umožňuje spojitě rozložení záření ve dvou úhlech. Směr paprsku vzniká přímo na detektoru a je dán úhly ve směru x a y .

Na obr. 21 je simulace zdroje Two Angle. Z ní je patrné, že ke směřování záření je potřeba natáčet celou plochu zdroje záření. Pro simulaci by tento zdroj posloužil, ale zkusíme najít vhodnější, který nebude třeba natáčet celý. V dalších simulacích nebude využíván.



Obr. 21: Simulace zdroje Source Two Angel

7.1.3 Source Rectangle

Source Rectangle je plošný obdélníkový zdroj záření, který emituje paprsky záření. Rozložení paprsků na povrchu detektoru je homogenní, ale směr paprsků lze měnit následujícím způsobem:

- všechny paprsky jsou vyzařovány z virtuálního bodu homogenně, polohu tohoto bodu lze libovolně v ose x a y měnit
- paprsky jsou z virtuálního bodu vyzařovány v závislosti na cosinu vyzařovacího úhlu a jsou popsány rovnicí (12)

$$I(\Theta) \approx I_0 (\cos \Theta)^{C_n} \quad (5)$$

kde C_n je konstanta větší nebo rovna jedné, čím větší C_n , tím se paprsky méně rozbíhají, rozložení je rotačně symetrické podle osy z

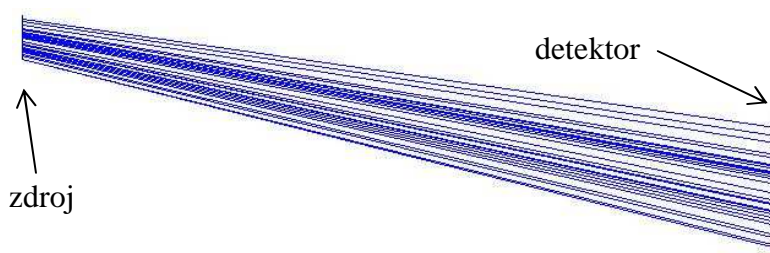
- paprsky jsou z virtuálního bodu vyzařovány v Gaussově rozložení podle rovnice (13)

$$I(l, m) \approx I_0 e^{-(G_x l^2 + G_y m^2)}, \quad (6)$$

kde l a m jsou směrové cosiny, G_x a G_y jsou konstanty, použití v případě, že rozložení je v ose x a y různé. Větší číslo u G_x nebo G_y znamená menší rozbíhavost paprsků v příslušném směru.

Způsob vyzařování je tedy definován hodnotami parametrů C_n , G_x a G_y . Pokud jsou všechny tyto parametry nulové, pak jsou všechny paprsky vyzařovány z virtuálního bodu přes zdroj záření. Pokud je C_n větší nebo rovno jedné nezávisle na jiných nastaveních, je rozložení vyzařování ovlivněno cosinem úhlu. Je-li C_n nula, a G_x nebo G_y je nenulové, pak bude rozdělení vyzařovaných paprsků Gaussovsky rozložené [14].

Na obr. 22 je simulace zdroje Source Rectangle. Z ní je patrné, že ke směrování záření není potřeba natáčet celou plochu zdroje záření, ale pouze virtuální bod, který záření směřuje.



Obr. 22: Simulace zdroje Source Rectangle

Ze simulace jednotlivých zdrojů lze rozhodnout, že nejvhodnější pro naši simulaci bude zdroj Source Rectangle, který nabízí simulaci záření, kterou bychom se mohli alespoň z části přiblížit reálnému záření. Další simulace budou prováděny pouze s tímto zdrojem. Vede pouze k přiblížení zdroje paprsků, protože Zemax má v nabídce pouze takové plošné zdroje, že z každého bodu vychází jediný paprsek pod určitým úhlem. Homogenní svazek paprsků nabízí pouze bodový zdroj, který nelze v případě naší simulace použít. Při reálné situaci je každý elementární bod zdrojem homogenního záření (z bodu vychází trs paprsků). Z obr. 22 je patrné, že simulace zdroje, který by se choval jako skutečný, je nereálná.

Rychlost simulace podstatně ovlivňuje parametr počtu vyzařovaných paprsků. Pokud se dostaneme nad hodnotu 100 tisíc, je simulace pomalá. Abychom se přiblížili ke skutečnému vyzařování, museli bychom použít nekonečný počet homogenně rozložených paprsků. To simulace neumožňuje.

7.1.4 Orientace záření na zrcadlovou stěnu

Dalším důležitým krokem je orientace reflexního pásku tak, aby se na detektor dostalo co nejvíce od stěny zrcadel odražených paprsků. Orientace se provádí z důvodu, že každý bod pásku vyzařuje pod určitým úhlem, a ne jako ve skutečnosti, kde každý bod je zdrojem homogenního záření. Úhel natočení reflexního pásku (respektive virtuálního bodu záření) není snadné teoreticky zjistit. Existuje analytický postup, kterým lze vypočítat souřadnice bodu na zrcadlové stěně, do kterého je třeba zářit [15]. Výsledek vede k řešení transcendentních rovnic.

Bod E - vyzařovací bod

Bod D - detekční bod

Bod C - střed kulového zrcadla

Bod S - hledaný bod na zrcadlové stěně

$$\overrightarrow{CS} \text{ leží v rovině s } \overrightarrow{CE} \text{ a } \overrightarrow{CD} \quad (7)$$

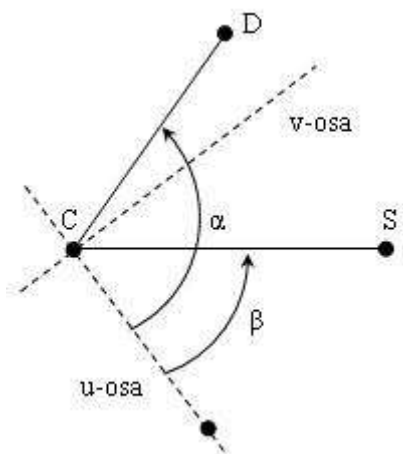
$$|\overrightarrow{CS}| = R \quad (8)$$

$$\sphericalangle(\overrightarrow{ES}, \overrightarrow{CS}) = \sphericalangle(\overrightarrow{CS}, \overrightarrow{DS}) \quad (9)$$

Pro matematickou formulaci problému je lepší zavést euklidovský systém s počátkem v bodě C. Osa \underline{u} zplývá s vektorem CE. Osa \underline{v} leží v rovině s vektorem \overrightarrow{CE} a \overrightarrow{CD} orientovaná tak, že $\hat{v} \cdot \overrightarrow{CD} > 0$. Strážka nad \underline{v} značí jednotkový vektor. Třetí osa \underline{w} je definovaná pomocí pravotočivého souřadného systému. Složky vektorů jsou:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{CE} &= (a, 0, 0) \\ \overrightarrow{CD} &= (d \cos \alpha, d \sin \alpha, 0) \\ \overrightarrow{CS} &= (R \cos \beta, R \sin \beta, 0)\end{aligned}\tag{10}$$

$|\overrightarrow{CE}| = a$ a $|\overrightarrow{CD}| = d$. Úhly jsou definovány na obrázku 23.



Obr. 23: Orientace vektorů a definice úhlů [15]

$$\hat{SC} \cdot \hat{SE} = \hat{SD} \cdot \hat{SC}\tag{11}$$

$$\hat{SC} \times \hat{SE} = \hat{SD} \times \hat{SC}\tag{12}$$

Druhá rovnice je vektorová. Všechny tři vektory jsou koplanární, jediný parametr je délka vektoru. První rovnice se upraví na

$$\frac{|\overrightarrow{SD}|}{|\overrightarrow{SE}|} = \frac{d(\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta) - R}{a \cos \beta - R}.\tag{13}$$

Vektorová rovnice představuje rovnost sinu úhlů, má pouze jednu nenulovou složku podél osy \underline{w} . Tím získáváme rovnici

$$\frac{|\overrightarrow{SD}|}{|\overrightarrow{SE}|} = \frac{d(-\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta)}{a \cos \beta}. \quad (14)$$

Kombinací těchto dvou rovnic získáváme

$$\sin(\alpha - 2\beta) + R(a \sin \beta - d \sin(\alpha - \beta)) = 0. \quad (15)$$

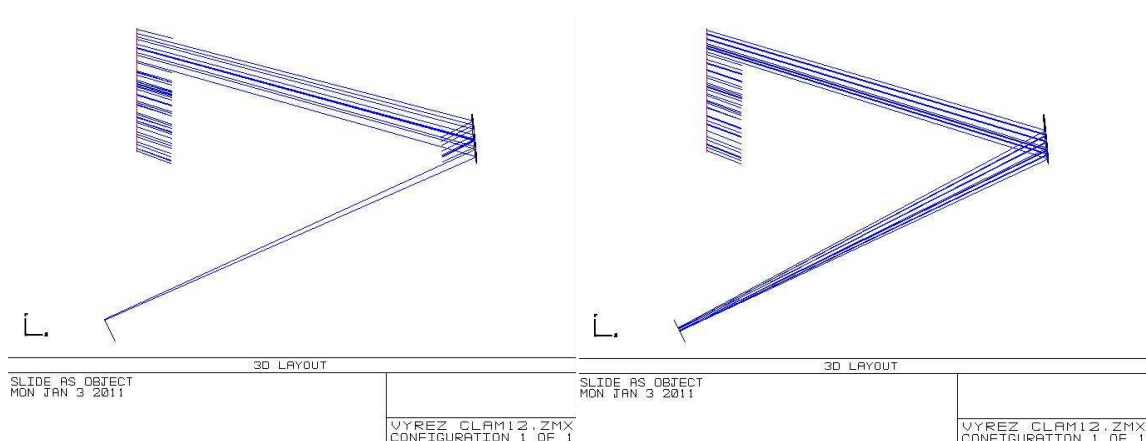
Řešení rovnice můžeme nyní hledat pomocí Newton-Raphson metodou. Metoda vede na řešení transcendentních rovnic.

Použijeme poloviční úhel α jako počáteční bod. Obvykle po třech iteracích je dosaženo konvergence. Bod zrcadlení na stěně zrcadel můžeme vypočítat z rovnice 16.

$$\vec{S} = \vec{C} + \left(\frac{R \cos \beta}{a} - \frac{R \sin \beta \cos \alpha}{a \sin \alpha} \right) \cdot \overrightarrow{CE} + \frac{R \sin \beta}{d \sin \alpha} \cdot \overrightarrow{CD} \quad (16)$$

Výhodnější řešení je využití funkce Slider. Tato funkce nám umožňuje měnit a zároveň například na 2D náhledu sledovat změny s měnící se proměnnou. Funkci Slider, kterou Zemax nabízí, nalezneme v záložce Tools-Miscellaneous. Hodnota, která má být proměnná, se musí v základním editoru komponent označit jako Variable. V okně Slideru stačí pouze navolit rozmezí hodnot, v nichž se má proměnná měnit. Po hrubé simulaci je možno interval hodnot zmenšit okolo požadované hodnoty a tím dosáhnout větší přesnosti.

V našem případě provádíme posuv virtuálního bodu zdroje Source Rectangle do té doby, až na detektor začne dopadat největší počet paprsků. Zastavíme simulaci a uložíme aktuální hodnotu proměnné (obr. 24). Způsob nyní popsany je časově méně náročný při shodných výsledcích s početní metodou.

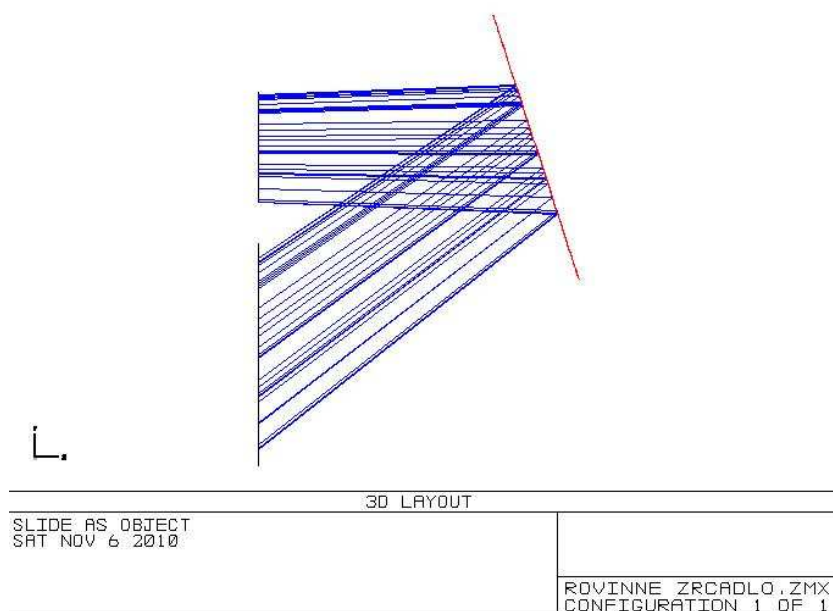


Obr. 24: Špatné nasměrování zdroje vlevo, správné nasměrování zdroje vpravo

7.2 Simulace stěny zrcadel

K počítačové simulaci celého monitorovacího systému RICH-1 je potřeba znát přesné rozměry detektoru, parametry použitých zrcadel a osově natočení jednotlivých zrcadlových segmentů. Uvedená mozaika zrcadel se skládá ze 116 sférických zrcadel o celkové ploše 21 m². Celá plocha zrcadel se skládá ze dvou shodných sférických částí, které jsou vychýleny od svislé osy o 5°. Zrcadla netrpí barevnou vadou, světlo jimi neprochází, ale odráží se.

Simulace je provedena v počítačovém programu Zemax, konkrétně v nesekvenciálním módu. Než jsem začal simulovat zrcadla pro konkrétní účely práce, zkoušel jsem si postupně zobrazovat reflexní pásek přes rovinné zrcadlo a sledoval obraz na plošném detektoru, obr. 25. Následovala simulace kulového zrcadla a opět detekce reflexního pásku. Postupem jsem zjišťoval, k čemu jsou jednotlivé parametry, které lze v simulaci nastavit, a sledoval vliv těchto nastavení na obraz reflexního pásku. Až se zobrazení začalo dařit, začal jsem postupně simulovat šestiúhelníkové a pětiúhelníkové zrcadlo. Postup simulace obou zrcadel je odlišný, jelikož se jedná o pravidelný šestiúhelník a nepravidelný pětiúhelník.

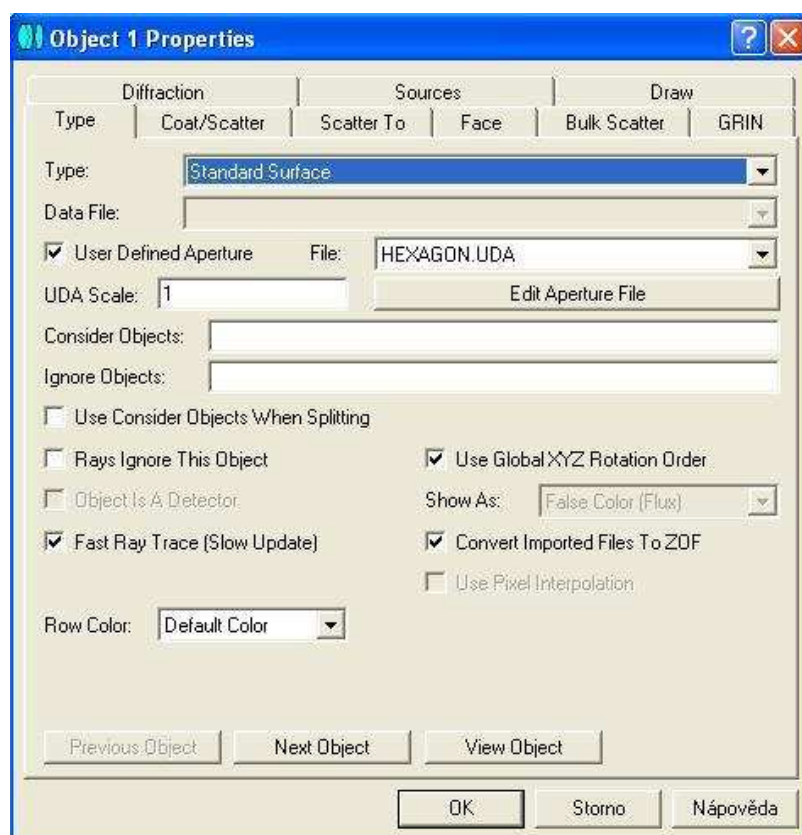


Obr. 25: Test principu simulace zdroje, zrcadlo a detektor

7.2.1 Simulace šestiúhelníkového zrcadla

- typ objektu jsem zvolil Standard Surface (obr. 26)
- abych se dostal do knihovny s tvary, je potřeba zaškrtnout User Defined Aperture
- z uživatelem definovaných objektů byl vybrán pravidelný n-úhelníkový tvar (HEXAGON.UDA) a následně editován a nastaven na hodnoty skutečných zrcadel použitých v detektoru
- v Edit Aperture File se nachází řádek ve formátu POL cx cy radius n angle
 - cx, cysouřadnice středu objektu
 - radius... poloměr kružnice opsané
 - n..... počet vrcholů
 - angle.....úhel natočení
- v mém případě řádek vypadá POL 0 0 260 6 90

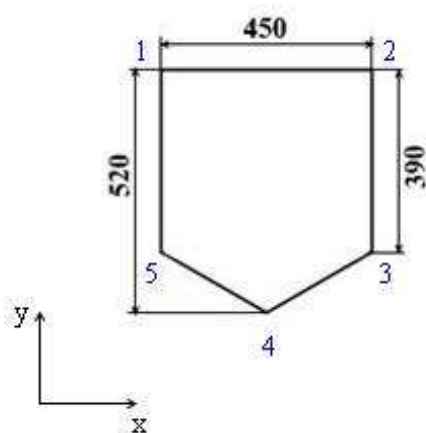
Další souřadnice polohy zrcadla v systému, poloměr křivosti, naklonění ve dvou rovinách a další, se nastavují přímo v základním editoru.



Obr. 26: Ukázka dialogového okna nastavení objektu

7.2.2 Simulace pětiúhelníkového zrcadla

- typ objektu jsem zvolil Standard Surface
- abych se dostal do knihovny s tvary, je potřeba zaškrtnout User Defined Aperture
- objekty, které nejsou pravidelnými n-úhelníky, je třeba nadefinovat souřadnicemi vrcholů. Ze souboru zvolíme LETTERC.UDA
- řádky ve tvaru $x_n \ y_n$, kde n je označení jednotlivého vrcholu a x, y jsou souřadnice jednotlivých vrcholů
- je nutné si zvolit střed zrcadla a z něj odvodit souřadnice vrcholů (obr. 27)



Obr. 27: Parametry, označení vrcholů a orientace souřadnic zrcadla

Poté lze snadno určit souřadnice jednotlivých vrcholů:

vrchol	souřadnice vrcholů	
	x	y
1	-225	260
2	225	260
3	225	-130
4	0	-260
5	-225	-130

7.2.3 Zadávání souřadnic a parametrů zrcadel

Základní editor nabízí spoustu nastavení jednotlivých parametrů. My z nich budeme potřebovat pouze nějaké. Mezi námi použité parametry patří x, y, z pozice, x, y, z natočení osy zrcadla, materiál a poloměr křivosti. Na obr. 28 je výřez z pracovní plochy Zemaxu při zadávání jednotlivých parametrů.

Program Zemax má pevně danou soustavu souřadnic, kterou využívají veškeré komponenty, je třeba provést transformaci os.

osa v RICH-1

x

y

z

osa v Zemaxu

z

x

y

Non-Sequential Component Editor			
Edit	Solves	Errors	Detectors Database Tools View Help
Object	Type	Comment	Ref Object
1	Standard Sur...	NT1	0
2	Standard Sur...	NT2	0
Object	Type	X Position	Y Position
1	Standard Sur...	230.337000	603.543000
2	Standard Sur...	689.888000	600.602000
Object	Type	Tilt About X	Tilt About Y
1	Standard Sur...	-5.246790	2.008420
2	Standard Sur...	-5.221160	6.025090
Object	Type	Material	Radius
1	Standard Sur...	MIRROR	-6600.000000
2	Standard Sur...	MIRROR	-6600.000000

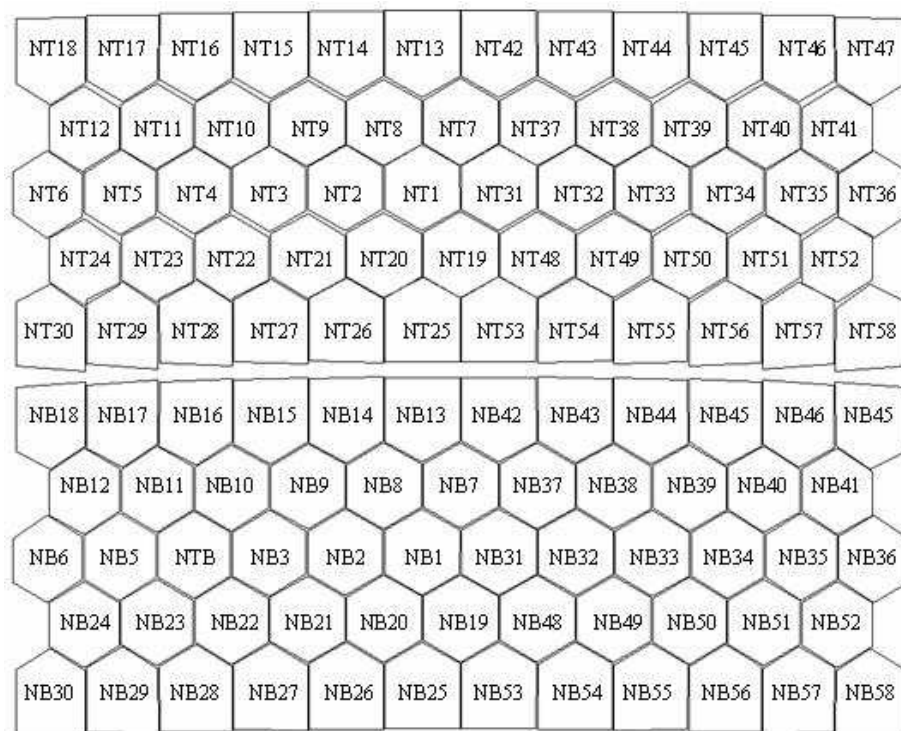
Obr. 28: Ukázka zadání souřadnic a parametrů

Zásadní problém se vyskytl při přenosu dat s nasimulovanými zrcadly mezi počítači. Při ukládání dat se do přenášených souborů nezaznamenávají data z námi editovaného textového souboru s uživatelskými rozměry zrcadel. Problém se nepodařilo vyřešit ani po konzultaci s Ing. Lukášem Steigrem, který se více zabývá SW částí počítačů.

První možné řešení je, k dvěma souborům, které Zemax ukládá (přípona zmx. a ses.), přidávat soubor hexagon.uda a letterC.uda, který je uložen v adresáři Zemax, podadresář Objects. Na jiném PC se následně nechají přepsat tyto dva adresáře. Poté se přenášející soubor s projektem na PC otevře s námi požadovanými rozměry zrcadel.

Druhé možné řešení je ručně změnit a uložit hodnoty v souborech hexagon.uda a letterC.uda.

Po vyřešení problému s přenosem dat mezi počítači jsem začal se simulací zrcadlové stěny. Souřadnice jednotlivých zrcadel jsou známy. Simulace zrcadla a nastavení jednotlivých parametrů není tolik náročné, protože zrcadla netrpí chromatickou (barevnou) vadou. Světlo zrcadly neprochází, ale odráží se od nich. Problém chromatické vady se tedy týká jenom čoček, respektive objektivů. Objektiv Canon použitý v detektoru RICH-1 jeví velmi dobré výsledky ohledně chromatické vady.



Obr. 29: Označení jednotlivých zrcadel horní a dolní poloviny stěny

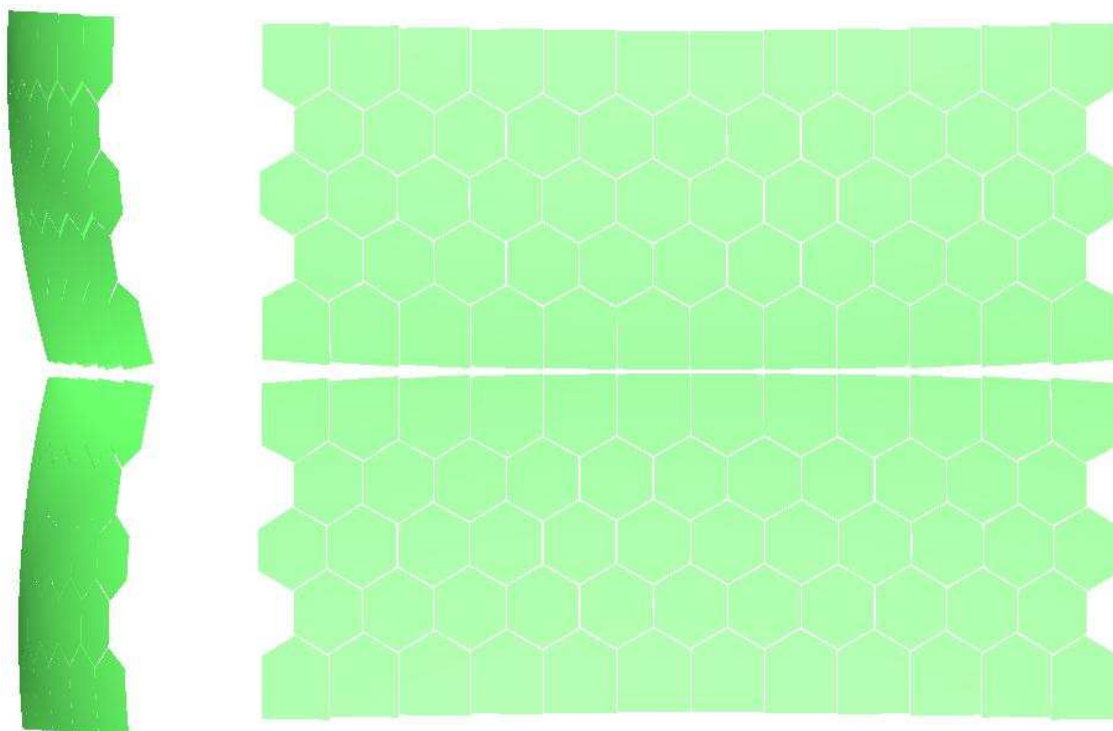
7.2.4 Souřadnice dolní levé čtvrtiny stěny zrcadel

	Sférické souřadnice				Kartézské souřadnice		
Zrcadlo	ρ [mm]	Θ [°]	Φ [°]	Ω [°]	x	y	z
NB1	6600	-5,24679	2,00842	0	230,337	603,543	6568,309
NB2	6600	-5,22116	6,02509	0	689,888	600,602	6536,309
NB3	6600	-5,17002	10,04127	0	1146,078	594,736	6472,464
NB4	6600	-5,09363	14,05664	0	1596,685	585,972	6377,087
NB5	6600	-4,99238	18,07091	0	2039,512	574,353	6250,641
NB6	6600	-4,86676	22,08379	0	2472,404	559,936	6093,742
NB7	6600	-8,71481	0	0	0,000	1000,007	6523,801
NB8	6600	-8,70191	4,03925	0	459,551	998,539	6507,821
NB9	6600	-8,66329	8,07805	0	916,863	994,141	6459,957
NB10	6600	-8,59913	12,11597	0	1369,709	986,834	6380,443
NB11	6600	-8,50977	16,15258	0	1815,881	976,656	6269,667
NB12	6600	-8,39566	20,18748	0	2253,207	963,654	6128,167
NB13	6600	-12,1806	2,03111	0	228,652	1392,560	6447,364
NB14	6600	-12,15468	6,09305	0	684,842	1389,641	6415,597
NB15	6600	-12,10297	10,15413	0	1137,696	1383,817	6352,220
NB16	6600	-12,02574	14,21382	0	1585,007	1375,117	6257,540
NB17	6600	-11,92339	18,27156	0	2024,596	1363,583	6132,019
NB18	6600	-11,79643	22,32687	0	2454,321	1349,272	5976,268
NB19	6600	-1,78519	0	0	0,000	205,606	6596,797
NB20	6600	-1,77244	3,99459	0	459,551	204,138	6580,816
NB21	6600	-1,73424	7,98896	0	916,863	199,740	6532,952
NB22	6600	-1,67079	11,98291	0	1369,709	192,434	6453,438
NB23	6600	-1,58239	15,97623	0	1815,881	182,255	6342,662
NB24	6600	-1,46947	19,96873	0	2253,207	169,253	6201,162
NB25	6600	1,68702	1,98623	180	228,652	-194,302	6593,176
NB26	6600	1,71237	5,95863	180	684,842	-197,221	6561,410
NB27	6600	1,76295	9,93087	180	1137,696	-203,045	6498,032
NB28	6600	1,83851	13,90284	180	1585,007	-211,745	6403,352
NB29	6600	1,93869	17,87447	180	2024,596	-223,278	6277,831
NB30	6600	2,06301	21,84568	180	2454,321	-237,590	6122,080

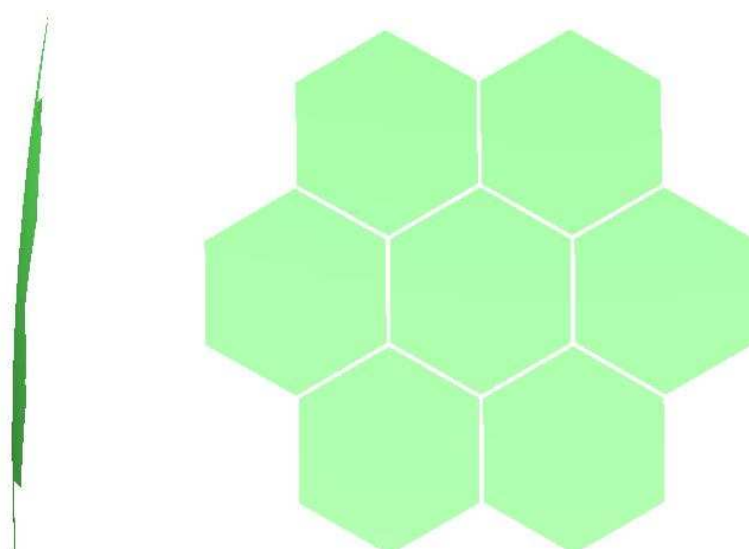
[16]

Při simulaci celé stěny zrcadel (obr. 30) jsem zjistil, že manipulace se stěnou (otáčení, náhledy, výpočty jednotlivých simulací, ...) je pomalá a můj stolní počítač pravděpodobně po hardwarové stránce nestačí. Vykreslování při pohledech bylo pomalé a někdy zaměstnalo počítač natolik, že byl potřeba restart Zemaxu nebo celého počítače. Proto jsem na další manipulaci začal pracovat s výřezem stěny (obr. 31). Použil jsem sedm zrcadel (NB1, NB2, NB7, NB8, NB19, NB20 a NB31), práce s tímto výřezem

byla rychlejší a výpočet simulací nebyl tolik časově náročný jako při výpočtech s celou stěnou (obr. 21).



Obr. 30: Simulace horní a dolní poloviny zrcadel, vlevo boční pohled, vpravo přímý pohled na stěnu zrcadel



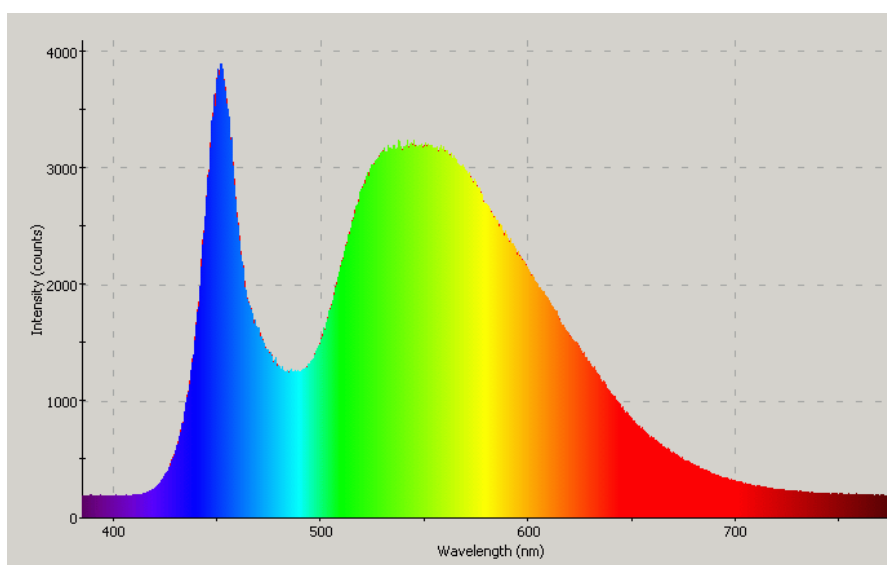
Obr. 31: Simulace zrcadel (NB1, NB2, NB7, NB8, NB19, NB20 a NB31)

7.3 Simulace objektivu

V detektoru RICH-1 se používají ke snímání obrazu reflexních pásků čtyři shodné fotoaparáty Canon 5D, které mají nasazený pevný objektiv Canon EF 24 mm f/2,8. Jedná se o světelný širokoúhlý objektiv s minimálním zkreslením obrazu. Plovoucí zadní zaostřovací systém koriguje astigmatismus a přináší vysoký kontrast a ostré podrobné vykreslení. Jako jeden z mála objektivů splňuje vysoké nároky pro použití v detektoru. Je to objektiv konstruovaný přímo na digitální zrcadlová těla se snímačem full frame.

Tím, že je v detektoru RICH-1 k osvětlení reflexní sítě použita vysoce svítivá bílá LED dioda s širokým barevným spektrem (obr. 32), nelze chromatickou vadu opomenout. Vhodnou volbou materiálu, uspořádáním čoček a jejich povrchovou úpravou bylo dosaženo minimalizace chromatické vady.

Chromatická vada je barevná vada čočky nebo složitější optické soustavy čoček (např. objektivu), způsobená závislostí ohniskové vzdálenosti čoček na vlnové délce světla. Fyzikální podstatou tohoto jevu je závislost indexu lomu u všech průhledných látek na vlnové délce. Čočky pak lámou světlo každé barvy jinak (záření dlouhovlnné, tedy červené, nejméně, krátkovlnné, tedy fialové, nejvíce), což se na snímku projeví jako barevné lemování ostrých přechodů mezi světlem a stínem.



Obr. 32: Spektrální rozložení světla bílé LED diody [17]

Simulace objektivu je velice náročná a lze se pouze přiblížit k parametrům skutečného objektivu. K dokonalé simulaci bylo potřeba znát mnoho parametrů, jako jsou přesné rozměry čoček, poloměry zakřivení, typy použitých skel, s tím souvisí index lomu, přesné geometrické rozměry vnitřního uspořádání jednotlivých čoček. Tyto parametry nejsou nikde k dispozici a ani firma Canon na mou žádost údaje neposkytla.

Pro první, velmi hrubé přiblížení, byl použit singlet, tedy jedna spojná čočka o ohniskové vzdálenost $f = 24$ mm. Tento krok je obzvláště vhodný k časové nenáročnosti výpočtu simulace. Pro prvotní přiblížení ani nevadí sférické zkreslení. Barevná aberace, která je maximálně korigována objektivem Canon, je v simulaci řešena použitím monochromatického světla o vlnové délce $\lambda = 550$ nm.

Simulaci předcházela přibližný výpočet parametrů spojně čočky. Cílem je v Zemaxu nasimulovat spojnou čočku s ohniskovou vzdáleností $f = 24$ mm. Vhodnou volbou parametrů, respektive poloměrů zakřivení obou ploch ze zobrazovací rovnice čočky, se přiblížíme k požadovanému ohnisku.

V praxi je obvykle tloušťka čočky d mnohem menší než poloměry křivosti jednotlivých lámavých ploch R_1 a R_2 , tzn. $d \ll R_1$ a $d \ll R_2$. Taková čočka se označuje jako tenká. V opačném případě se mluví o tlusté čočce.

Ohniskovou vzdálenost čočky lze vyjádřit také pomocí poloměrů křivosti jednotlivých lámavých ploch R_1 a R_2 a indexu lomu čočky n . Získáme tak tzv. zobrazovací rovnici tlusté čočky.

$$f = \frac{nR_1R_2}{(n-1)[n(R_2 - R_1) + (n-1)d]} = -f' \quad (10)$$

Pro tenkou čočku lze tuto zobrazovací rovnici přepsat do tvaru:

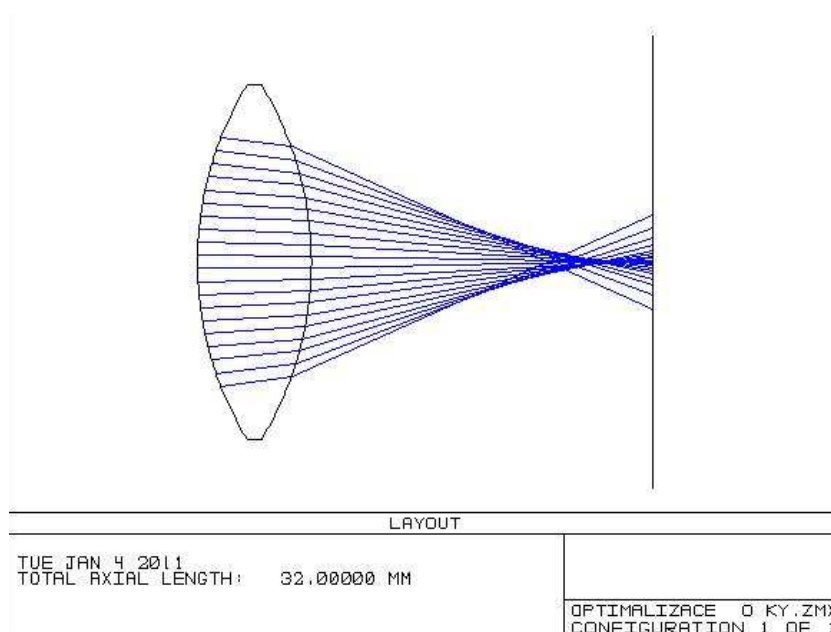
$$f = \frac{nR_1R_2}{(n-1)(R_2 - R_1)} = -f' \quad (11)$$

Z rovnice (10) lze vhodnou poloměrů křivosti R_1 a R_2 vytvořit spojnou čočku s ohniskovou vzdáleností $f = 24$ mm. Pro urychlení volby parametrů byl vytvořen v MS Excelu vzorec. Z experimentů jsem došel k výsledku při poloměru křivosti $R_1 = 80$ mm a $R_2 = -15$ mm.

7.3.1 Optimalizace Singletu

Lepší řešení je však simulace Singletu pomocí Zemaxu v sekvenciálním módu. Řekněme, že potřebujeme singlet (jednoduchou čočku) F4 s ohniskovou vzdáleností 24 mm. F4 znamená, že průměr apertury čočky je $f/4 = 24/4 = 6$ mm. Začneme jednoduchým návrhem, který budeme postupně zlepšovat.

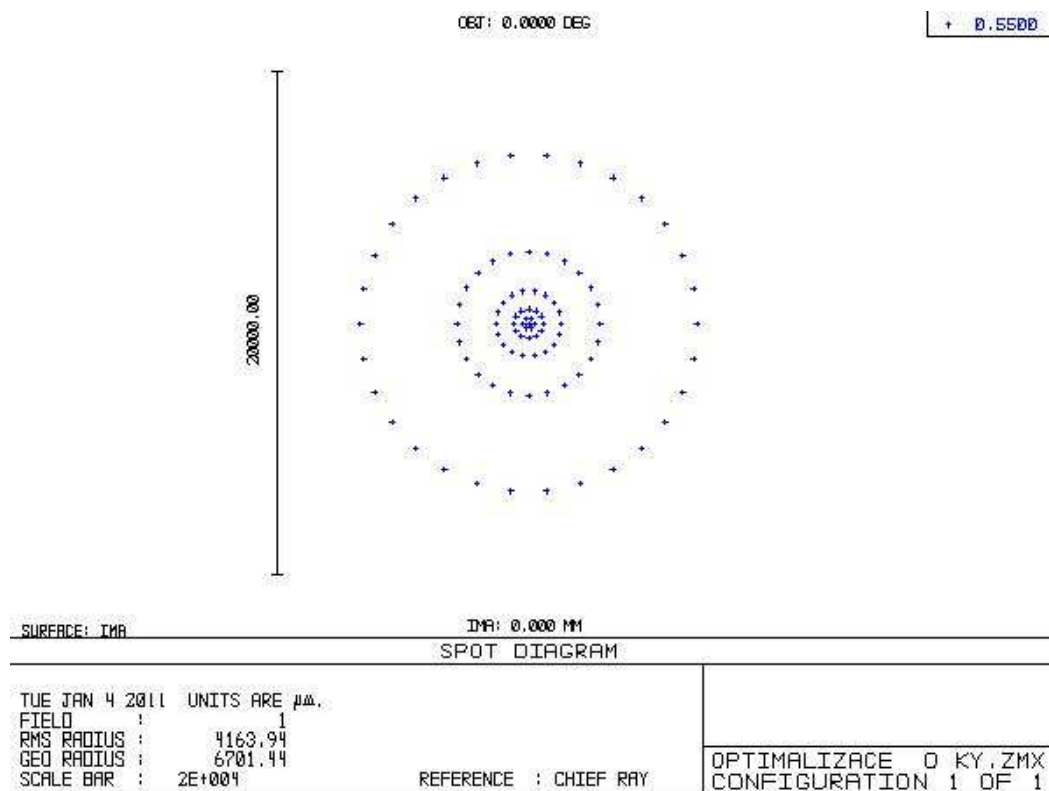
V editoru Zemaxu [Lens Data Editor] zadáme jednoduchou čočku $R_1 = 24$ mm, tloušťka 8 mm, sklo BK7, $R_2 = -24$ mm. Tím máme základní singlet vytvořen (obr. 33).



Obr. 33: Podhled na čočku

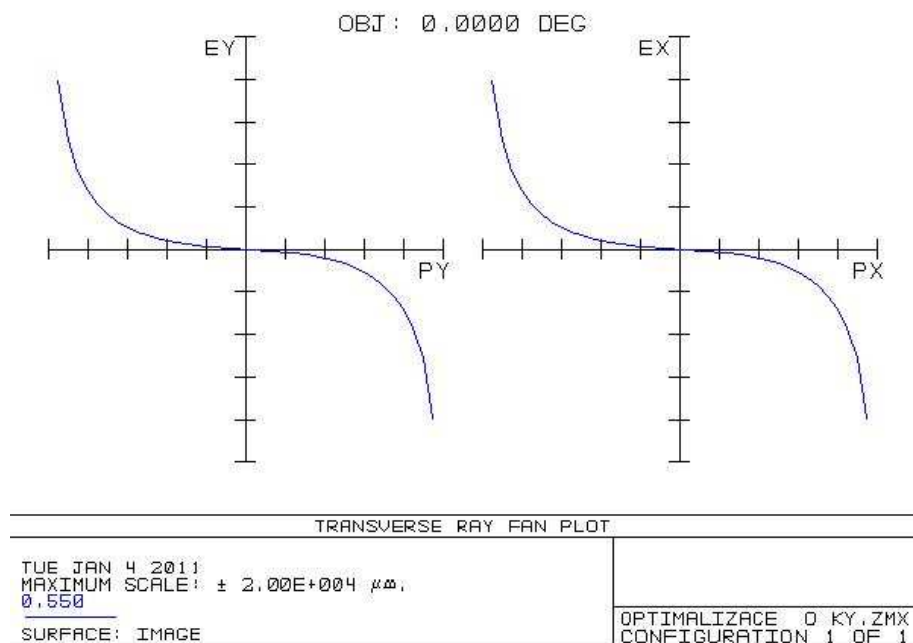
Vidíme, že se paprsky jdoucí větším poloměrem více lámou a protínají optickou osu dříve než paprsky u osy. Z toho plyne, že bod v nekonečno se nám nezobrazí jako bod, ale jako ploška. Zobrazení je sférickými ovlivněno vadami.

Zobrazíme si obraz našeho bodu v nekonečnu před čočkou, tzv. Spot diagram. Z Grafu 1 je vidět, že průměr bodu je přibližně 14 mm.



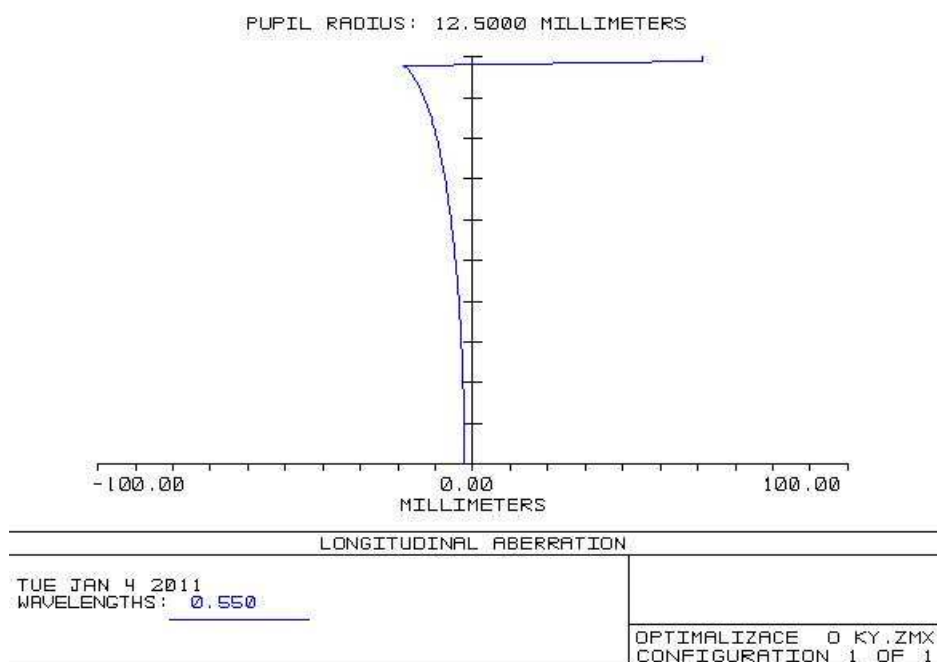
Graf 1: Spot diagram pro předmětový bod v nekonečnu

Vady zobrazení můžeme sledovat ještě na „Ray fan“ grafu, který zobrazuje závislost příčné vady zobrazení E_x (otvorové vady) na vzdálenosti průsečíku paprsku ve vstupní pupile P_x . Z obrázku 4 je vidět, že příčná vada je největší pro paprsek procházející maximálním průměrem vstupní pupily P_y a vada je přibližně 10 mm, což odpovídá spot diagramu.



Graf 2: Otvorová vada pro předmětový bod v nekonečnu

Poslední užitečný graf, který zobrazuje průběh podélné otvorové vady, je označen jako Longitudinal. Na y-ose je vynesena poloměr paprsku ve vstupní pupile, na x-ose vzdálenost průsečíku s optickou osou od obrazové roviny (podélná otvorová vada). Z obrázku 5 je vidět, že vzdálenost ohniska od obrazové roviny je přibližně 4 mm.

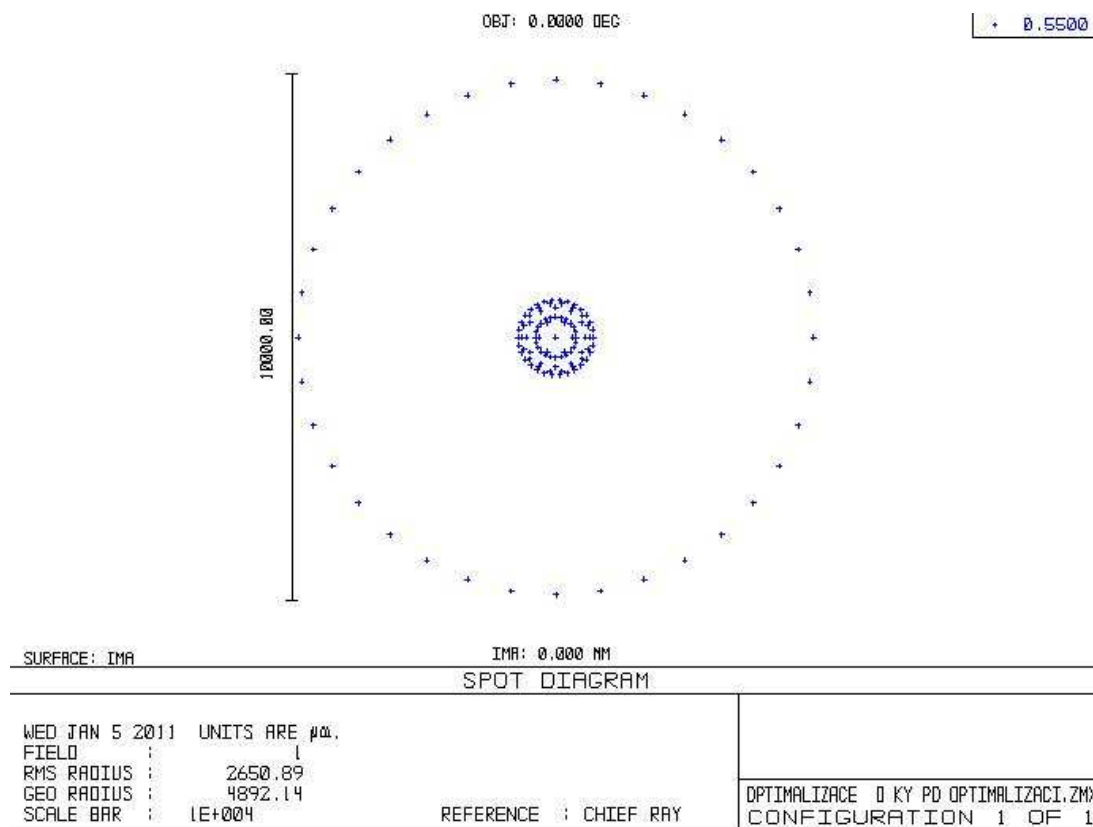


Graf 3: Podélná otvorová vada pro předmětový bod v nekonečnu

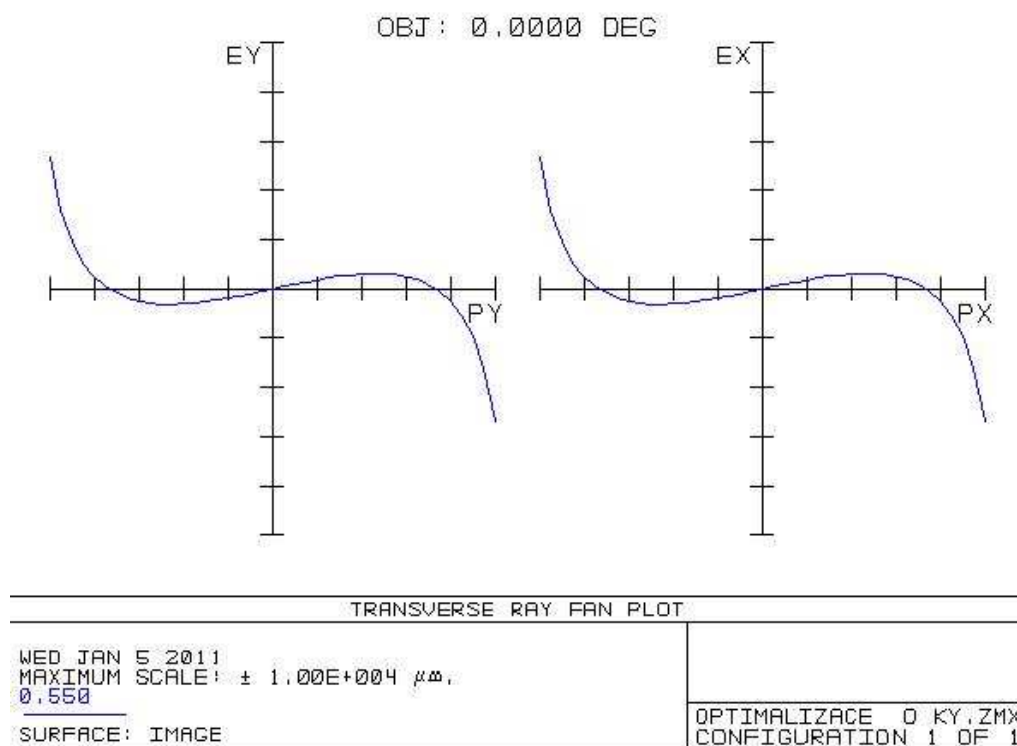
Nyní je potřeba optimalizovat parametry čočky. Zjistili jsme, že námi zvolená obrazová rovina je ve špatné pozici. Musíme ji tedy posunout do polohy paraxiálního ohniska, kam se bod v nekonečnu zobrazuje. Potřebujeme změnit tloušťku povrchu 2. Buď můžeme zmenšit tloušťku povrchu 2 a posunout obrazovou rovinu, nebo nám Zemax umožňuje mnohem přesnější řešení. Ve volbě Solve Type u tloušťky povrchu dva změníme nastavení na Marginal Ray Height. Tím změní tloušťku druhého povrchu tak, aby velikost Marginal Ray Height byla rovna hodnotě Height, což je 0. V našem případě 0 znamená použití paraxiální trajektorie.

Optimální volba polohy obrazové roviny by byla v nejužším místě svazku paprsku. Ve volbě Solve Type zvolíme Variable. Tím říkáme, že je tento rozměr proměnný. Je potřeba nadefinovat pomocí funkce Merit Function, co chceme optimalizovat [20].

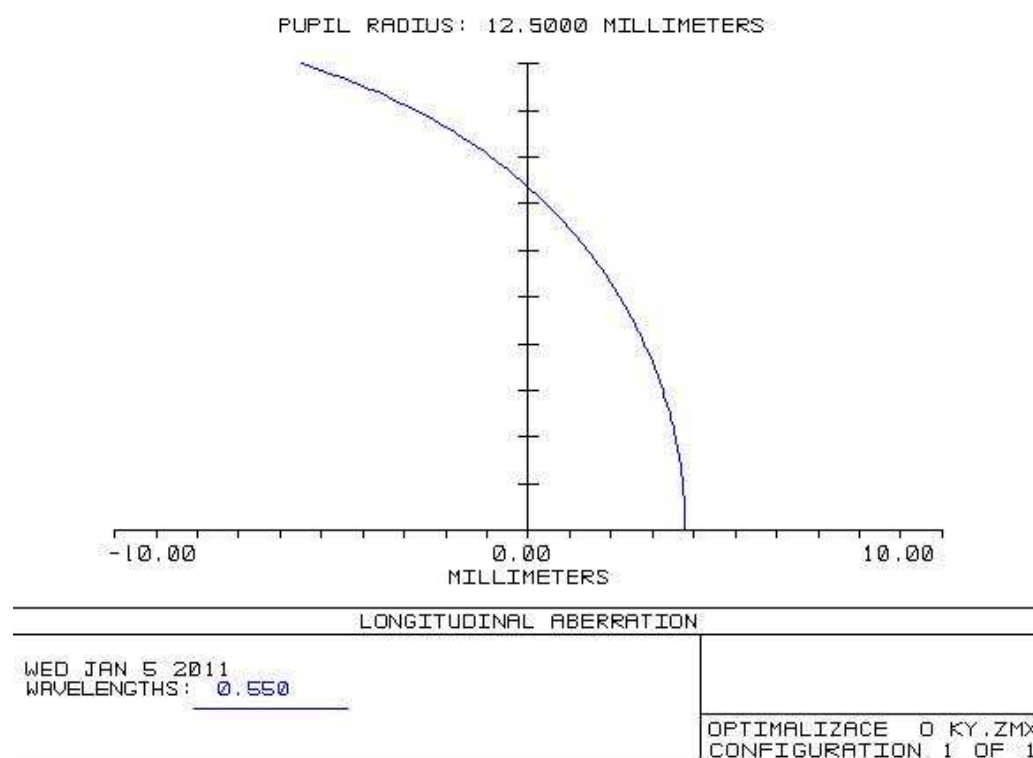
Po optimalizaci čočky můžeme na grafech vidět podstatné vylepšení jednotlivých parametrů. Parametry čočky jsou: $R_1 = 15,8753$ mm, $R_2 = 54,7540$ mm, tloušťka 8 mm, sklo BK7 s indexem lomu $n = 1,518$.



Graf 4: Spot diagram pro předmětový bod v nekonečnu – optimalizovaná čočka

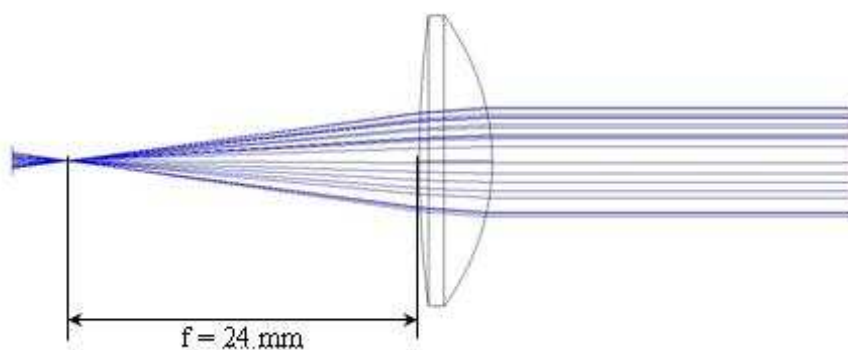


Graf 5: Otvorová vada pro předmětový bod v nekonečnu – optimalizovaná čočka

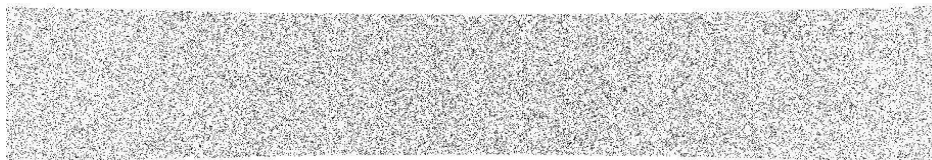


Graf 6: Podélná otvorová vada pro předmětový bod v nekonečnu – optimalizovaná čočka

Simulace nyní ukazuje ohnisko kolem vzdálenosti 24,65 mm. Pro přesnou optimalizaci využijeme pomůcky Slider v záložce Tools-Miscellaneous. Před tím je potřeba zvolit jednu veličinu jako proměnnou (variable), nejlépe poloměr křivosti R_2 . Slider nám umožní sledovat změnu ohniskové vzdálenosti v závislosti na změně poloměru křivosti od–do definované oblasti hodnot. Na detektoru můžeme sledovat posun ohniska a v případě 24 mm lze Slider zastavit a hodnotu poloměru křivosti uložit. Tím dostaneme optimalizovanou spojnou čočku s ohniskovou vzdáleností $f = 24$ mm (obr. 34). Čočka trpí silnou sférickou vadou (obr. 35). Ta je způsobena malým poloměrem křivosti lámavých ploch, ale pro první hrubé přiblížení simulace nám zkreslení až tolik nevadí.



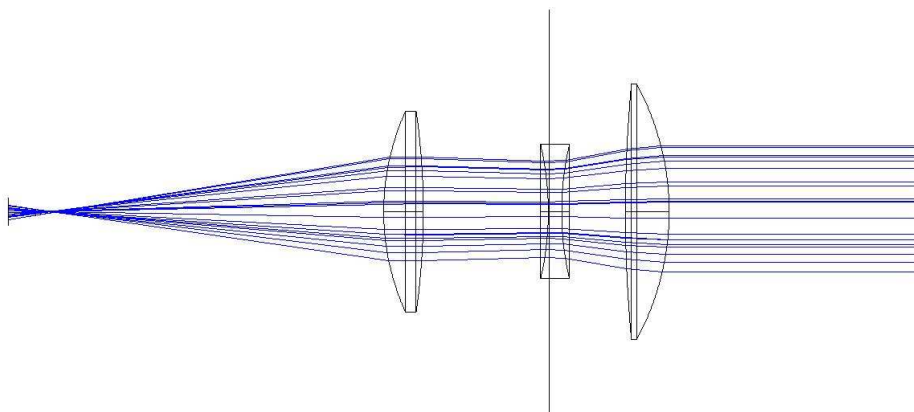
Obr. 34: Simulace spojně čočky s ohniskovou vzdáleností $f = 24$ mm



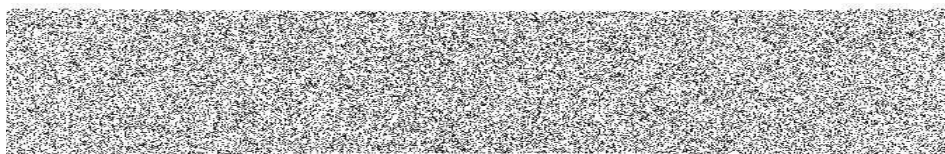
Obr. 35: Sférické zkreslení proužku jako vzoru

7.3.2 Simulace tripletu

Použitím jedné optimalizované čočky již nelze dosáhnout lepších zobrazovacích vlastností. Pro korekci sférického zkreslení jsem se snažil optimalizovat čočkovou soustavu tak, abych se nejvíce přiblížil zkreslení objektivu Canon 5D, obr. 36. Nyní je zkreslení podstatně menší, obr. 37.



Obr. 36: Simulace optické soustavy s ohniskovou vzdáleností $f = 24 \text{ mm}$



Obr. 37: Sférické zkreslení proužku snímaného optickou soustavou

Tím, že se mi nepodařilo vhodně spojit jednotlivé části objektivu do jednoho objektu, se kterým by se manipulovalo lépe, je třeba při správném umístění využít interpolačních rovnic (12). To není nijak dramatické, jelikož se v simulaci jedná o statické objekty, tedy objekty, se kterými se po správném ustavení nehýbe.

Přesné souřadnice jednotlivých fotoaparátů a úhly os objektivů nebyly nikdy přesně změřeny a měly by vyplynout z disertační práce Ing. Lukáše Steigra.

Interpolace souřadnic x, y, z při natáčení objektivu o Θ a Φ :

$$x' = x \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Phi$$

$$y' = y \cdot \sin \Theta \cdot \sin \Phi$$

$$z' = z \cdot \cos \Theta$$

(12)

7.4 Simulace detektoru

Snímání reflexní sítě je v detektoru RICH-1 realizováno čtyřmi digitálními fotoaparáty značky Canon s označením 5D.

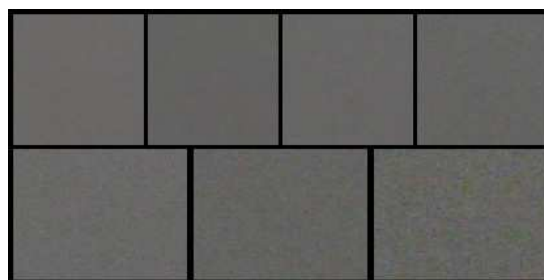
Mezi požadavky, které musí splňovat, patří co nejvyšší rozlišení, aby mohlo být později užito co nepřesnějšího elektronického zpracování na počítači (vyhodnocování a korekce nepřesností). Dále též možnost připojení externího napájení fotoaparátů a synchronizovaná, dálkově ovládaná spoušť.

Fotoaparát Canon využívá snímací čip CMOS o velikosti 35,8 mm x 23,9 mm s efektivním rozlišením 12,8 Mpix. V kombinaci velikosti čipu a rozlišení vychází velikost jedné buňky (pixelu) na čipu $8,2 \mu\text{m} \times 8,2 \mu\text{m}$. Maximální rozlišení, které lze s fotoaparátem dosáhnout, je 4368×2912 bodů (pixelů).

S použitým čipem také souvisí minimální šum při nízkých nastavených ISO. Ještě při citlivosti ISO 400 jsou snímky bez viditelného šumu a velmi podobné je to i při citlivosti ISO 800. Lehký šum vystupuje na ISO 1600, ale ve srovnání s DSLR zrcadlovkami s APS-C snímačem je to stále velmi dobré. Viditelnější barevný šum s jemným zrnem vystupuje na citlivosti ISO 3200, ale snímky jsou stále použitelné. Díky vysokému rozlišení je zde stále prostor pro softwarové úpravy [7], [9], [18].



Obr. 34: CMOS čip 12,8Mpix [9]



Obr. 35: Šum na neutrálně šedé při citlivosti (zleva doprava a shora dolů: ISO 50, 100, 200, 400, 800, 1600 a 3200) [9]

7.4.1 Výběr vhodného detektoru

Počítačový program Zemax umožňuje v nesekvenciálním módu výběr ze tří typů detektorů (detector rect, detector surf, detector volume). V manuálu je potřeba zjistit, jaký detektor bude pro simulaci čipu fotoaparátu nejvhodnější. Požadavky na simulaci detektoru jsou následující: plošný detektor s nastavitelnou velikostí a pixelací (tedy maximálním rozlišením).

Detector Volume: objemový detektor, pro naši simulaci nevhodný.

Detector Surf: kruhový nebo prstencový detektor s libovolným počtem pixelů na radiální a úhlové směry, opět nevhodný k simulaci čipu.

Detector Rectangle: je nejuniverzálnější plochý obdélníkový detektor s libovolnou velikostí, libovolnou pixelací, možností směrového natáčení ve třech osách roviny. Obsahuje možnost nastavení dalších parametrů, které pro simulaci nepotřebujeme. Tento zdroj může zachytit a zobrazit koherentní a nekoherentní záření, point spread function a další data. Volbou materiálu v NSC editoru: mirror, prázdné políčko, absorb zajistíme, že detektor dopadající záření od nesekvenciálních zdrojů záření buď odrazí, propustí nebo absorbuje [13]. Pro simulaci čipu CMOS fotoaparátu Canon 5D je tento typ detektoru nejvhodnější z důvodu tvaru a možnosti nastavení jednotlivých parametrů.

7.4.2 Detector Rectangle

Možnost výpočtů a rychlost simulací je ovlivněna rychlostí a hardwarovým vybavením počítače. Jelikož nedisponuji nejrychlejším počítačem, Zemax zjistí z konfigurace PC maximální možné rozlišení detektoru (počet pixelů) a při zvolení většího rozlišení než je možné, nahlásí chybu. Rozlišení na mém počítači se pohybuje kolem hodnoty 2500×2500 pixelů. Maximální rozlišení (počet pixelů) při tom není závislé na fyzické velikosti detekční plochy. Je potřeba provést opatření, abychom dostali rozlišovací schopnost jako ve skutečnosti.

Nabízí se více variant. Pracovat s určitým poměrem počtu pixelů vůči skutečnému rozlišení, pak velikost jednotlivých pixelů bude jiná než ve skutečnosti

a bude potřeba provádět přepočty. Tímto bychom ale přišli o přesnost měření. Snažíme se přitom pracovat s co nejvyšším rozlišením.

Dále je možno detektor složit z více elementů detekčních ploch a dosáhnout velikosti pixelu $8,2 \times 8,2 \mu\text{m}$, tedy rozměru jednotlivých pixelů na čipu ve fotoaparátu. Problémem je manipulace a natáčení jednotlivých elementů jako jeden celek. Je potřeba provádět přepočty souřadnic při každé změně natočení, což je při odladování celku velmi časově náročné.

Nejlepší řešení je zmenšit rozměr detektoru tak, aby velikost jednoho pixelu odpovídala skutečné velikosti. Dostaneme sice menší plochu, která nevykryje celou snímanou scénu (čtvrtinu zrcadlové plochy), ale pohybem v souřadnicovém systému nakonec můžeme zachytit jednotlivé části zrcadlové stěny. Tento způsob je i nejšetrnější k výkonu stolního počítače.

7.4.3 Výpočet rozměru simulovaného detektoru

Abychom využili největší počet pixelů, které Zemax na mém PC umožňuje, změníme tvar obdélníkového senzoru na téměř čtvercový s rozměry 2400×2400 pixelů. Nyní je třeba vypočítat fyzickou velikost simulovaného detektoru.

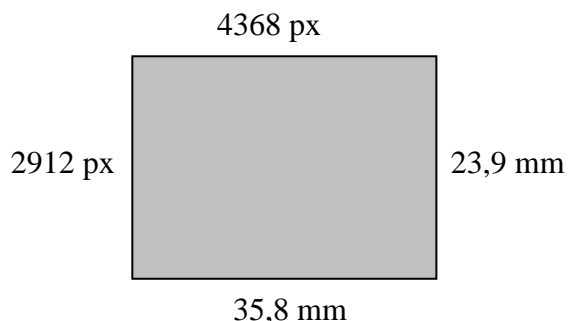
Z obr. 15 lze snadno vypočítat rozměr jednoho pixelu:

- šířka pixelu: $35,8 : 4368 = 0,008196 \text{ mm} = 8,196 \mu\text{m}$
- výška pixelu: $23,9 : 2912 = 0,008207 \text{ mm} = 8,207 \mu\text{m}$

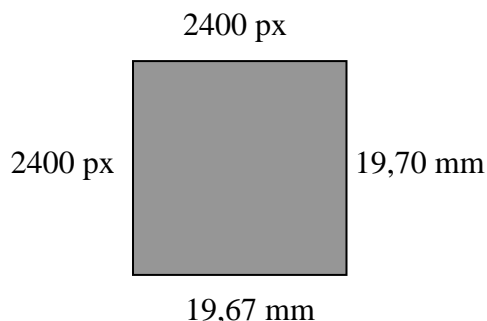
Maximální počet pixelů detektoru při simulaci je 2400×2400 px. Z toho vyplývá fyzický rozměr detektoru při shodné velikosti jednotlivých pixelů:

- šířka detektoru: $2400 \times 0,008196 = 19,67 \text{ mm}$
- výška detektoru: $2400 \times 0,008207 = 19,70 \text{ mm}$

Rozměry detektoru, které naše simulace využívá, jsou 19,67 mm × 19,70 mm a jsou znázorněny na obrázku 37.



Obr. 36: Velikost detektoru Canonu 5D



Obr. 37: Velikost detektoru v simulaci

Správné umístění detektoru (čipu) se v reálném experimentu nemusí řešit, jelikož objektiv a detektor tvoří jeden systém (fotoaparát).

Abychom mohli umístit detektor k soustavě čoček a vytvořit tak plnohodnotnou snímací sestavu, je potřeba zjistit následující věc. Bere-li program Zemax ohniskovou vzdálenost objektivu od hlavní roviny objektivu nebo od vrchlíku poslední čočky.

Jednoduchá simulace spojné čočky, zdroje a detektoru ukázala, že ohnisková vzdálenost se bere jako vzdálenost ohniska od vrchlíku poslední čočky.

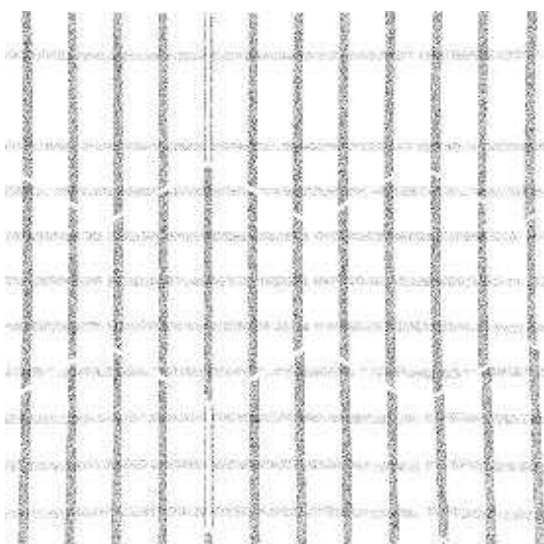
Fotografovaný předmět vytvoří za objektivem obraz. Pro jednoznačnou orientaci se nazývá vše před objektivem předmětový prostor (tedy prostor, ve kterém jsou fotografované předměty) a vše za objektivem obrazový prostor (prostor, do kterého se promítají obrazy předmětů). Obraz se vytvoří výškově i stranově převrácený a je ostrý vždy tam, kde se všechny paprsky od předmětového bodu procházející objektivem protínají, tzn. v jednom bodě. Právě zde musí být při fotografování umístěna citlivá vrstva (detektor), aby daný bod ve výsledku vyšel ostře.

8 Simulace detektoru jako celku

V předcházejících kapitolách byla provedena simulace jednotlivých komponent systému monitorování polohy zrcadel.

Simulace kompletního detektoru byla velmi náročná na hardwarové vybavení počítače, proto byla provedena pouze s částí zrcadlové stěny. Databáze Zemaxu bohužel disponuje omezeným typem světelných zdrojů. Navržený zdroj plně nesplňuje požadavky, které má mít ve skutečnosti, viz kap. 7.1.

Obrázek 38 zachycuje obraz reflexní sítě na stěně zrcadel. Jedná se o nerozladěná zrcadla (obrazy pásků na sebe navazují) [19].



Obr. 38: *Obraz reflexní sítě na stěně zrcadel*



Obr. 39: *Vychýlené zrcadlo
o 1 mrad vůči svislé ose*

V případě rozladění polohy zrcadla nastane případ (obr. 39), kdy je vidět nespojitost obrazu pásků. V tomto případě se jedná o natočení zrcadla o 1 mrad vůči přesné poloze. Tomu odpovídá vychýlení obrazu pásků o cca. 10–11 pixelů, experimentálně změřená hodnota Marka Švece je 6–8 pixelů. Obr. 39. naznačuje, že se simulace zaobírá správným směrem a její další rozšiřování a zdokonalování má význam.

9 Závěr

V průběhu diplomové práce jsem se seznámil s optickým softwarem Zemax, ve kterém bylo potřeba navrhnout, nasimulovat a otestovat jednotlivé komponenty pro snímání rozladění zrcadel v detektoru RICH-1, který je součástí projektu COMPASS ve výzkumném středisku CERN.

Při týdenním pobytu v CERN počátkem roku 2010 jsem se aktivně podílel na řešení problémů týkajících se detektoru RICH-1. Seznámil se s detailnější funkcí projektu COMPASS, setkal se se zahraničními odborníky, kteří na projektu pracují delší dobu a se kterými jsem byl do té doby v kontaktu pouze elektronicky.

Práce obsahuje mnou navrhnuté zdroje záření jako reflexní pásky, které se využívají k projekci na zrcadlovou stěnu a následně detekci tohoto obrazu fotoaparátem. Navržený zdroj bohužel plně nesplňuje požadavky, které má mít ve skutečnosti, z důvodu omezených dostupných typů zdrojů v databázi programu. Zdroj v Zemaxu vyzařuje z každého bodu zdroje pouze jeden paprsek, v realitě je to homogenní pole. Součástí je dále simulace stěny zrcadel, které tvoří dvě velké sférické plochy, složené ze 116 zrcadel. Zrcadla jsem nasimuloval a orientoval do prostoru dle specifik detektoru RICH-1. Obraz mřížky snímá objektiv, který je obtížné navrhnout z důvodu neznalosti jednotlivých parametrů, jako jsou přesné rozměry čoček, poloměry zakřivení, typy použitých skel, s tím souvisí index lomu, přesné geometrické rozměry vnitřního uspořádání jednotlivých čoček. Tyto parametry nejsou nikde k dispozici a ani firma Canon na mou žádost údaje neposkytla. Proto jsem pro snímání nejprve optimalizoval jednoduchou spojnou čočku a následně optickou soustavu. Dokončení komponent detektoru předcházela simulace a optimalizace detektoru, který zde představuje snímací čip fotoaparátu Canon 5D. Povedlo se mi dosáhnout stejné pixelace, jako je u skutečného čipu. Není tedy třeba žádných přepočtů při následném určení rozladění zrcadel.

Má diplomová práce se tedy zabývá konkrétním návrhem reflexních pásek, zrcadlové stěny složené ze sférických zrcadel a monitorovací soustavy včetně snímacího detektoru.

V práci, která by měla navazovat na mou diplomovou práci, je vhodné nalézt přesné úhly os jednotlivých objektivů a simulace kvalitnější optické soustavy pro snímání obrazu reflexní mřížky.

10 Literatura

[1] *Worldwide LHC Computing Grid* [online]. 2010 [cit. 2010-06-04].

Logos & Templates. Dostupné z WWW:

<http://lcg.web.cern.ch/lcg/images/logos/CERN_logo_400x400.gif>.

[2] LAUB, M., *Development of opto-mechanical tools and procedures for the new generation of RICH-detectors at CERN*. Praha 2001. 157 s. Disertační práce. ČVUT.

[3] KRAMER, Daniel, *Optical concentrators for Čerenkov light detector*. Liberec, 2005. 56 s. Diplomová práce. TUL.

[4] FAULAND, P., *The COMPASS Experiment and the RICH-1 Detector*. Mannheim, 2004. 153 s. Dizertační práce. Universität Bielefeld Mannheim.

[5] ALBRECHT, E et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 502, (2003). 236–240 s.

[6] ŠVEC, Marek. *Monitorování zrcadel v detektoru Čerenkovova záření*. Liberec, 2007. 81 s. Diplomová práce. TUL.

[7] COSTA, S., *The COMPASS RICH1 mounting of the mirrors*, (Prezentace) Ženeva: CERN, RICH, 2004.

[8] COSTA, S. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 553, (2005). 135–139 s.

[9] FILIP, David; PIHAN, Roman Canon EOS 5D : 12,8 MPix snímač velikosti kinofilmu v praxi. In *Fotografvani.cz* [online]. [s.l.] : [s.n.], 29.11.2005 [cit. 2011-01-06]. Dostupné z WWW:
<http://www.fotografvani.cz/art/forec_amater/canon-5d-r.html?pos=0>.

- [10] *NIPPON CARBIDE INDUSTRIES CO.,INC.* [online]. 2009 [cit. 2010-11-10]. The structure of Retro-reflective Sheeting. Dostupné z WWW: <http://www.carbide.co.jp/en/functional_film/retroreflective/>.
- [11] *Optima Research* [online]. 2006 [cit. 2011-01-07]. Sequential mode. Dostupné z WWW: <<http://www.optima-research.com/index.php?page=sequential>>.
- [12] *Optima Research* [online]. 2006 [cit. 2011-01-07]. Non-sequential mode. Dostupné z WWW: <<http://www.optima-research.com/index.php?page=non-sequential>>.
- [13] ALEXEEV, M et al. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 595, (2008). 194–196 s.
- [14] ZEMAX Development Corporation. *ZEMAX - User's Guide*. [s.l.] : [s.n.], 15.10.2007. 726 s.
- [15] AKOPOV, N. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 479, (2002). 511–530 s.
- [16] ABBON, P et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 577, (2007). 455–518 s.
- [17] CAVER, Peter. *Replacement of carbide lamps by LED lamps* [online]. 2006 [cit. 2011-01-02]. Candlepowerforums. Dostupné z WWW: <<http://www.candlepowerforums.com/vb/showthread.php?t=185217&page=2>>.
- [18] ABBON, P. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 567, (2006). 114 s.
- [19] ALBRECHT, E. et al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 553 (2005). 215 s.
- [20] ZEMAX – návod do cvičení, ÚFI FS VUT v Brně.

11 Přílohy

Příloha 1. Souřadnice středů jednotlivých zrcadel v detektoru RICH-1 [16]

- dolní levá čtvrtina (zrcadla NB1-NB30)

Zrcadlo	Sférické souřadnice				Kartézské souřadnice		
	ρ [mm]	Θ [°]	Φ [°]	Ω [°]	x	y	z
NB1	6600	-5,24679	2,00842	0	230,337	603,543	6568,309
NB2	6600	-5,22116	6,02509	0	689,888	600,602	6536,309
NB3	6600	-5,17002	10,04127	0	1146,078	594,736	6472,464
NB4	6600	-5,09363	14,05664	0	1596,685	585,972	6377,087
NB5	6600	-4,99238	18,07091	0	2039,512	574,353	6250,641
NB6	6600	-4,86676	22,08379	0	2472,404	559,936	6093,742
NB7	6600	-8,71481	0	0	0,000	1000,007	6523,801
NB8	6600	-8,70191	4,03925	0	459,551	998,539	6507,821
NB9	6600	-8,66329	8,07805	0	916,863	994,141	6459,957
NB10	6600	-8,59913	12,11597	0	1369,709	986,834	6380,443
NB11	6600	-8,50977	16,15258	0	1815,881	976,656	6269,667
NB12	6600	-8,39566	20,18748	0	2253,207	963,654	6128,167
NB13	6600	-12,1806	2,03111	0	228,652	1392,560	6447,364
NB14	6600	-12,15468	6,09305	0	684,842	1389,641	6415,597
NB15	6600	-12,10297	10,15413	0	1137,696	1383,817	6352,220
NB16	6600	-12,02574	14,21382	0	1585,007	1375,117	6257,540
NB17	6600	-11,92339	18,27156	0	2024,596	1363,583	6132,019
NB18	6600	-11,79643	22,32687	0	2454,321	1349,272	5976,268
NB19	6600	-1,78519	0	0	0,000	205,606	6596,797
NB20	6600	-1,77244	3,99459	0	459,551	204,138	6580,816
NB21	6600	-1,73424	7,98896	0	916,863	199,740	6532,952
NB22	6600	-1,67079	11,98291	0	1369,709	192,434	6453,438
NB23	6600	-1,58239	15,97623	0	1815,881	182,255	6342,662
NB24	6600	-1,46947	19,96873	0	2253,207	169,253	6201,162
NB25	6600	1,68702	1,98623	180	228,652	-194,302	6593,176
NB26	6600	1,71237	5,95863	180	684,842	-197,221	6561,410
NB27	6600	1,76295	9,93087	180	1137,696	-203,045	6498,032
NB28	6600	1,83851	13,90284	180	1585,007	-211,745	6403,352
NB29	6600	1,93869	17,87447	180	2024,596	-223,278	6277,831
NB30	6600	2,06301	21,84568	180	2454,321	-237,590	6122,080

- dolní pravá čtvrtina (zrcadla NB31-NB58)

	Sférické souřadnice				Kartézské souřadnice		
Zrcadlo	ρ [mm]	Θ [°]	Φ [°]	Ω [°]	x	y	z
NB31	6600	-5,24679	-2,0084	0	-230,337	603,543	6568,309
NB32	6600	-5,22116	-6,02509	0	-689,888	600,602	6536,309
NB33	6600	-5,17002	-10,04127	0	-1146,078	594,736	6472,464
NB34	6600	-5,09363	-14,05664	0	-1596,685	585,972	6377,087
NB35	6600	-4,99238	-18,07091	0	-2039,512	574,353	6250,641
NB36	6600	-4,86676	-22,08379	0	-2472,404	559,936	6093,742
NB37	6600	-8,70191	-4,03925	0	-459,551	998,539	6507,821
NB38	6600	-8,66329	-8,07805	0	-916,863	994,141	6459,957
NB39	6600	-8,59913	-12,11597	0	-1369,709	986,834	6380,443
NB40	6600	-8,50977	-16,18748	0	-1815,881	976,656	6269,667
NB41	6600	-8,39566	-20,18748	0	-2253,207	963,654	6128,167
NB42	6600	-12,1806	-2,03111	0	-228,652	1392,560	6447,364
NB43	6600	-12,15468	-6,09305	0	-684,842	1389,641	6415,597
NB44	6600	-12,10297	-10,15413	0	-1137,696	1383,817	6352,220
NB45	6600	-12,02574	-14,21382	0	-1585,007	1375,117	6257,540
NB46	6600	-11,92339	-18,27156	0	-2024,596	1363,583	6132,019
NB47	6600	-11,79643	-22,32687	0	-2454,321	1349,272	5976,268
NB48	6600	-1,77244	-3,99459	0	-459,551	204,138	6580,816
NB49	6600	-1,73424	-7,98896	0	-916,863	199,740	6532,952
NB50	6600	-1,67079	-11,98291	0	-1369,709	192,434	6453,438
NB51	6600	-1,58239	-15,97623	0	-1815,881	182,255	6342,662
NB52	6600	-1,46947	-19,96873	0	-2253,207	169,253	6201,162
NB53	6600	1,68702	-1,98623	180	-228,652	-194,302	6593,176
NB54	6600	1,71237	-5,95863	180	-684,842	-197,221	6561,410
NB55	6600	1,76295	-9,93087	180	-1137,696	-203,045	6498,032
NB56	6600	1,83851	-13,90284	180	-1585,007	-211,745	6403,352
NB57	6600	1,93869	-17,87447	180	-2024,596	-223,278	6277,831
NB58	6600	2,06301	-21,84568	180	-2454,321	-237,590	6122,080

- horní levá čtvrtina (zrcadla NT1-NT30)

	Sférické souřadnice				Kartézské souřadnice		
Zrcadlo	ρ [mm]	Θ [°]	Φ [°]	Ω [°]	x	y	z
NT1	6600	5,24679	2,00842	0	230,337	2781,896	6568,309
NT2	6600	5,22116	6,02509	0	689,888	2778,977	6536,309
NT3	6600	5,17002	10,04127	0	1146,078	2773,153	6472,464
NT4	6600	5,09363	14,05664	0	1596,685	2764,453	6377,087
NT5	6600	4,99238	18,07091	0	2039,512	2752,919	6250,641
NT6	6600	4,86676	22,08379	0	2472,404	2738,608	6093,742
NT7	6600	8,71481	0	0	0,000	2378,179	6523,801
NT8	6600	8,70191	4,03925	0	459,551	2375,259	6507,821
NT9	6600	8,66329	8,07805	0	916,863	2369,435	6459,957
NT10	6600	8,59913	12,11597	0	1369,709	2360,735	6380,443
NT11	6600	8,50977	16,15258	0	1815,881	2349,201	6269,667
NT12	6600	8,39566	20,18748	0	2253,207	2334,890	6128,167
NT13	6600	12,1806	2,03111	180	228,652	1992,560	6447,364
NT14	6600	12,15468	6,09305	180	684,842	1989,641	6415,597
NT15	6600	12,10297	10,15413	180	1137,696	1983,817	6352,220
NT16	6600	12,02574	14,21382	180	1585,007	1975,117	6257,540
NT17	6600	11,92339	18,27156	180	2024,596	1963,583	6132,019
NT18	6600	11,79643	22,32687	180	2454,321	1949,272	5976,268
NT19	6600	1,78519	0	0	0,000	3172,579	6596,797
NT20	6600	1,77244	3,99459	0	459,551	3169,660	6580,816
NT21	6600	1,73424	7,98896	0	916,863	3163,836	6532,952
NT22	6600	1,67079	11,98291	0	1369,709	3155,136	6453,438
NT23	6600	1,58239	15,97623	0	1815,881	3143,602	6342,662
NT24	6600	1,46947	19,96873	0	2253,207	3129,291	6201,162
NT25	6600	-1,68702	1,98623	0	228,652	3579,422	6593,176
NT26	6600	-1,71237	5,95863	0	684,842	3576,503	6561,410
NT27	6600	-1,76295	9,93087	0	1137,696	3570,679	6498,032
NT28	6600	-1,83851	13,90284	0	1585,007	3561,979	6403,352
NT29	6600	-1,93869	17,87447	0	2024,596	3550,445	6277,831
NT30	6600	-2,06301	21,84568	0	2454,321	3536,134	6122,080

- horní pravá čtvrtina (zrcadla NT1-NT30)

	Sférické souřadnice				Kartézské souřadnice		
Zrcadlo	ρ [mm]	Θ [°]	Φ [°]	Ω [°]	X	Y	Z
NT31	6600	5,24679	-2,0084	0	-230,337	2781,896	6568,309
NT32	6600	5,22116	-6,02509	0	-689,888	2778,977	6536,309
NT33	6600	5,17002	-10,04127	0	-1146,078	2773,153	6472,464
NT34	6600	5,09363	-14,05664	0	-1596,685	2764,453	6377,087
NT35	6600	4,99238	-18,07091	0	-2039,512	2752,919	6250,641
NT36	6600	4,86676	-22,08379	0	-2472,404	2738,608	6093,742
NT37	6600	8,70191	-4,03925	0	-459,551	2378,178	6507,821
NT38	6600	8,66329	-8,07805	0	-916,863	2375,259	6459,957
NT39	6600	8,59913	-12,11597	0	-1369,709	2369,435	6380,443
NT40	6600	8,50977	-16,18748	0	-1815,881	2360,735	6269,667
NT41	6600	8,39566	-20,18748	0	-2253,207	2349,201	6128,167
NT42	6600	12,1806	-2,03111	180	-228,652	1992,560	6447,364
NT43	6600	12,15468	-6,09305	180	-684,842	1989,641	6415,597
NT44	6600	12,10297	-10,15413	180	-1137,696	1983,817	6352,220
NT45	6600	12,02574	-14,21382	180	-1585,007	1975,117	6257,540
NT46	6600	11,92339	-18,27156	180	-2024,596	1963,583	6132,019
NT47	6600	11,79643	-22,32687	180	-2454,321	1949,272	5976,268
NT48	6600	1,77244	-3,99459	0	-459,551	3169,660	6580,816
NT49	6600	1,73424	-7,98896	0	-916,863	3163,836	6532,952
NT50	6600	1,67079	-11,98291	0	-1369,709	3155,136	6453,438
NT51	6600	1,58239	-15,97623	0	-1815,881	3143,602	6342,662
NT52	6600	1,46947	-19,96873	0	-2253,207	3129,291	6201,162
NT53	6600	-1,68702	-1,98623	0	-228,652	3579,422	6593,176
NT54	6600	-1,71237	-5,95863	0	-684,842	3576,503	6561,410
NT55	6600	-1,76295	-9,93087	0	-1137,696	3570,679	6498,032
NT56	6600	-1,83851	-13,90284	0	-1585,007	3561,979	6403,352
NT57	6600	-1,93869	-17,87447	0	-2024,596	3550,445	6277,831
NT58	6600	-2,06301	-21,84568	0	-2454,321	3536,134	6122,080

Příloha 2. Souřadnice reflexních pásků v detektoru RICH-1

- horizontální reflexní pásy

Reflexní pásek	Kartézské souřadnice		
	x	y	z
H1	0	470	3647
H2	0	580	3647
H3	0	690	3647
H4	0	800	3647
H5	0	910	3647
H6	0	1020	3647
H7	0	1130	3647
H8	0	1240	3647
H9	0	1350	3647
H10	0	1460	3647
H11	0	1570	3647
H12	0	1680	3647
H13	0	1790	3647
H14	0	1900	3647
H15	0	2010	3647
H16	0	2120	3647
H17	0	2230	3647
H18	0	2340	3647
H19	0	2450	3647
H20	0	2560	3647
H21	0	2670	3647
H22	0	2780	3647
H23	0	2890	3647

- vertikální reflexní pásy

Reflexní pás	Kartézské souřadnice		
	x	y	z
V1	0	1680	3647
V2	110	1680	3647
V3	220	1680	3647
V4	330	1680	3647
V5	440	1680	3647
V6	550	1680	3647
V7	660	1680	3647
V8	770	1680	3647
V9	880	1680	3647
V10	990	1680	3647
V11	1100	1680	3647
V12	1210	1680	3647
V13	1320	1680	3647
V14	1430	1680	3647
V15	1540	1680	3647
V16	1650	1680	3647
V17	-110	1680	3647
V18	-220	1680	3647
V19	-330	1680	3647
V20	-440	1680	3647
V21	-550	1680	3647
V22	-660	1680	3647
V23	-770	1680	3647
V24	-880	1680	3647
V25	-990	1680	3647
V26	-1100	1680	3647
V27	-1210	1680	3647
V28	-1320	1680	3647
V29	-1430	1680	3647
V30	-1540	1680	3647
V31	-1650	1680	3647